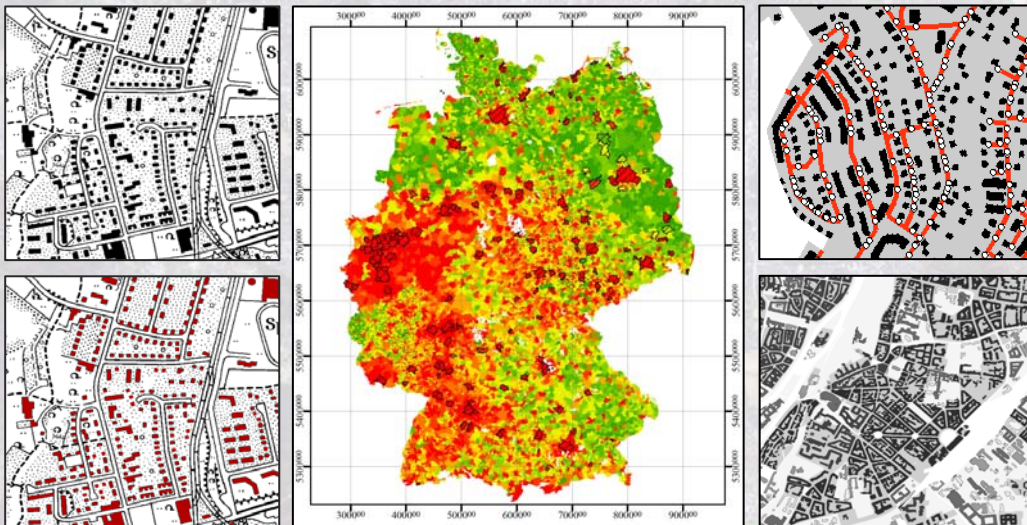


Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD)  
Abteilung Landoberfläche (LA)

## Endbericht

zum Vorhaben:

# Potenzialanalyse zum Aufbau von Wärmenetzen unter Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale



Förderkennzeichen:

**3 004 775**

Laufzeit des Vorhabens:

**01.10.2010 – 31.12.2010**

Auftraggeber: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung  
Referat II7

Fasanenstraße 87  
10623 Berlin

Auftragnehmer: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gesellschaft  
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD)  
Abteilung Landoberfläche (LA)

Oberpfaffenhofen  
82230 Weßling

Bearbeitung: Dr. Thomas Esch  
Dr. Hannes Taubenböck  
Christian Geiß  
Dr. Christoph Schillings  
Michael Nast  
Annekatriin Metz  
Dr. Wieke Heldens  
Manfred Keil

Oberpfaffenhofen, den 18. Februar 2011

## Zentrale Inhalte und Ergebnisse

Wärmenetze spielen eine gewichtige Rolle im Kontext von Klimaschutz und Energieeffizienz. So ist der verstärkte Einsatz effizienter Energietechniken sowohl zur Erreichung von Klimaschutzziele als auch zur Etablierung einer nachhaltigen Energieversorgung unabdingbar. Ansatzpunkte zur Umsetzung einer nachhaltigen Energieversorgung sind die Steigerung der Energieproduktivität und -effizienz, die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien, die Erweiterung der dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sowie der Erhalt und die Modernisierung von zentralen Heizkraftwerken. Dem Ausbau von Nah- und Fernwärmenetzen – speziell in Kombination mit Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sowie der gesteigerten Nutzung regenerativer Nahwärme – ist vor diesem Hintergrund eine zentrale Bedeutung beizumessen. In Deutschland beträgt der Anteil der Fernwärme am Raumwärmemarkt annähernd 14 %, bei einer Anzahl von zirka 1400 Netzen mit einer Netzlänge von rund 19000 km und einer Anschlussleistung von etwa 57000 MWth (Megawatt thermisch). Zur Erreichung der CO<sub>2</sub>-Minderungsziele der Bundesregierung muss laut Szenarien des Bundesumweltministeriums (BMU) der Anteil der Fern- und Nahwärme im deutschen Wärmemarkt deutlich gesteigert werden. Die im Jahr 2050 genutzte Wärmemenge aus erneuerbaren Energien soll zu 60 % auf Wärmenetzen beruhen. Ausbaukapazitäten ergeben sich bei der Verdichtung der Anschlüsse in bestehenden Netzen, bei der Erweiterung in periphere Bereiche und beim Neubau von Netzen. Um das Potenzial zum Aufbau einer leitungsgebundenen Wärmeversorgung zu bewerten, ist eine Analyse der siedlungsstrukturellen Gegebenheiten und des daraus resultierenden Entwicklungspotenzials erforderlich.

Vor diesem Hintergrund ist die Bewertung des aktuellen bundesweiten Wärmenetzpotenzials ein wichtiger Baustein. Über das Wärmenetzpotenzial können Aussagen bezüglich der physisch-strukturellen Standortbedingungen für Nahwärme getroffen werden. Das Wärmenetzpotenzial errechnet sich über den Quotienten aus jährlichem Wärmebedarf der Gebäude und Investitionskosten zur Bereitstellung der benötigten Wärme. Der entsprechende Kennwert repräsentiert die durch das Versorgungssystem jährlich erschließbare Wärmemenge [kWh/a] pro investierter Geldeinheit [€]. Der spezifische Wärmebedarfswert hängt von Typ und Nutzung des Gebäudes, dem Baualter sowie den klimatischen Rahmenbedingungen ab. Die Abschätzung der Kosten für die Wärmeinfrastruktur basiert auf einer Analyse der Längen und zugehörigen Kosten für Hauptverteilungs- und Hausanschlussleitungen, die wiederum über eine Auswertung des Straßennetzes und der Lage der Gebäude modelliert werden kann. Der Wärmebedarf setzt sich aus dem Gebäudevolumen und dem spezifischen Wärmebedarfswert zusammen, während die Investitionskosten alle Aufwendungen für Verteilnetz, Anschlussleitungen, Hausübergabestationen sowie die Einsparungen für Heizkessel einschließen. Entscheidend für die Durchführbarkeit einer bundesweiten, räumlich und the-

matisch hoch detaillierten Auswertung siedlungsstruktureller Gegebenheiten zur Berechnung des Wärmenetzpotenzials ist die Verfügbarkeit geeigneter raumbezogener Daten sowie die Nutzung einer zeit- und kosteneffizienten Methodik zur Erstellung der notwendigen Geoinformationsprodukte. Hinsichtlich der Methodik kann das Wärmenetzpotenzial unter Nutzung von Verfahren der digitalen Bildanalyse und geographischer Informationssysteme über eine Kombination von Top-down und Bottom-up Ansatz für das gesamte Gebiet der BRD ermittelt werden. Der Top-down Ansatz kommt bei der Abschätzung des Wärmebedarfs auf Grundlage von Daten zum Gebäudebestand und der klimatischen Situation zum Einsatz. Der Gebäudebestand wird dabei durch Infas-Geodaten zu Gebäudetyp (Ein-/Zwei-Familienhäuser, kleine und große Mehrfamilienhäuser) und Gebäudealter (neun Bauperioden) sowie Informationen des Statistischen Bundesamtes zur Gebäudenutzung (Wohngebäude, Nichtwohngebäude) bestimmt. Die klimatischen Gegebenheiten können mit Hilfe der vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellten Gradtagzahlen dargestellt werden. Die Berechnung der leitungsgelassenen Investitionskosten erfolgt Bottom-up unter Einbeziehung von Daten des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems zur Lage von Siedlungsflächen und dem Verlauf des Straßennetzes (Ermittlung Hauptverteilungs- und Hausanschlussleitungen) sowie unter Nutzung von Informationen zum Gebäudebestand (Lage, Grundfläche), der aus Digitalen Topographischen Karten (Maßstab 1:25.000) extrahiert wird. Die Ergebnisse der bundesweiten Auswertung zeigen, dass das Wärmenetzpotenzial neben dem örtlichen Wärmebedarf stark von der Länge der Wärmeverteilungen abhängt. Diese ist eng gekoppelt an die Siedlungsstruktur. Daher weisen insbesondere Kernstädte und deren verdichtetes Umland hohe Werte auf, während das ländliche Umland bzw. der ländliche Raum vergleichsweise geringe Potenziale aufweisen. Grundsätzlich werden in der Südhälfte Deutschlands weithin günstige, im Nordosten der BRD hingegen relativ ungünstige Strukturen angetroffen. Dies zeigt sich besonders an der Länge der Hausanschlussleitungen, die den mittleren Abstand zwischen Straße und Gebäude widerspiegeln. Für die Wärmeverteilungskosten wurden je nach Region Werte zwischen 1,7 und 3,3 ct/kWh ermittelt. Damit stellen die Verteilungskosten kein wesentliches Hemmnis für einen deutlich stärkeren Ausbau von Wärmenetzen dar. Am unteren Rand der Kostenbandbreite liegen die westlichen und die südwestlichen Länder sowie erwartungsgemäß die Großstädte. Entsprechend hohe Potenziale können hier für den Nahwärmeausbau erwartet werden. Am ungünstigen Ende befinden sich die Neuen Bundesländer im Nordosten Deutschlands. Zusätzlich wird der Ausbau von Wärmenetzen dort auch aus demographischen Gründen erschwert.

Neben der bundesweit flächendeckend durchgeführten Abschätzung des Wärmenetzpotenzials wurden darüber hinaus im Rahmen des Projektes räumlich hoch detaillierte, energiebezogene Analysen auf Quartiersebene durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurde anhand von Fallstudien in der Stadtregion München das Anwendungsspektrum siedlungsstruk-



turbbezogener Inventarisierungen auf Quartiersebene bezüglich energierelevanter Fragestellungen demonstriert. Die Anwendungsbeispiele umfassten die Typisierung der Stadtstruktur und die Kartierung der urbanen Landbedeckung, die Erfassung von begrünten Dächern und Solarflächen, die Bewertung des Photovoltaikpotenzials sowie die Modellierung des quartiersbezogenen Wärmenetzpotenzials und der mikroklimatischen Situation. Die Auswertungen basierten auf einer Datengrundlage aus fernerkundlichen Informationen (multispektrale, hyperspektrale und thermale Erdbeobachtungsdaten, digitales Oberflächenmodell basierend auf Daten eines flugzeuggetragenen Sensors) und kommerzieller Daten zum Gebäudebestand (häuserscharfe Infas-Geodaten zu Bauperioden) und den klimatischen Gegebenheiten (Gradtagzahlen des Deutschen Wetterdienstes). Die Resultate legen dar, dass eine physisch-strukturelle Charakterisierung von Siedlungsquartieren auf Grundlage einer Analyse räumlich und thematisch höchst aufgelöster Geodaten vielseitig verwendbare Informationen über die lokalen und regionalen Standortbedingungen liefert. Dies eröffnet auch für Betrachtungen und Analysen zum Klimaschutz sowie der Energieeffizienz auf lokaler Ebene bislang nicht gekannte Möglichkeiten.

Mit Blick auf die Perspektiven bezüglich quartiersbezogener Potenzialanalysen auf Bundesebene belegen die Ergebnisse der Studie, dass eine bundesweit flächendeckende Erhebung und Auswertung von Geoinformationen zur raumstrukturellen Kennzeichnung und Bewertung von Siedlungsflächen auf Ebene von Quartieren möglich ist. So zeichnet sich ab, dass sich durch entsprechende Analysen zahlreiche, bislang nur auf empirischer oder räumlich abstrahierter Basis durchführbare Betrachtungen in eine nutzerorientierte Dimension bzw. praxisnahe Umsetzung überführen lassen. Dies gilt speziell für Anwendungen im Rahmen der Raumbesichtigung, der Energieversorgung, der Infrastrukturplanung oder Verkehrs- und Mobilitätsforschung. Mit Blick auf die Herausforderungen einer räumlich und thematisch hoch detaillierten Auswertung siedlungsstruktureller Gegebenheiten auf Bundesebene, ist die Verfügbarkeit zweckdienlicher Daten der entscheidende Faktor. Basierend auf den Erkenntnissen der vorliegenden Studie sind hier folgende Merkmale unabdingbar: Flächendeckung, bundeseinheitliche Standardisierung, digitales Format, Raumbezug in ausreichender räumlicher Detaillierung, präzise Verortung und Geometrie, geeignete Semantik, Aktualität und Perspektive der Fortschreibung, zentrale Datenvorhaltung und vertretbare Anschaffungskosten bzw. kostengünstiger oder -freier Datenzugang. Die formulierten Voraussetzungen werden insbesondere von den Geobasisdaten der amtlichen Vermessung erfüllt. Mit leichten Einschränkungen - vor allem hinsichtlich der Beschaffungskosten - werden auch Satellitenaufnahmen und bestimmte kommerziell vertriebene Daten mit Raumbezug - etwa statistische oder klimatologische Informationen - den formulierten Anforderungen gerecht. Abgebildet auf die betrachteten Anwendungen ergibt sich hinsichtlich der Durchführbarkeit einer bundesweiten Umsetzung auf Quartiersebene folgende Einschätzung: die Typisierung der Stadtstruktur

und die Ausweisung einfacher urbaner Landbedeckungsklassen, die Inventarisierung begrünter Dachflächen und die Modellierung des Wärmenetzpotenzials erscheinen sowohl aus technisch-methodischer Sicht als auch unter datenbezogenen Gesichtspunkten realisierbar. Die Bewertung des Photovoltaikpotenzials ist technologisch machbar, allerdings sind aktuell bundesweit flächendeckend noch keine digitalen Oberflächenmodelle mit hinreichender Genauigkeit verfügbar. Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus dem enormen Prozessierungsaufwand, der mit einer entsprechenden Analyse einhergeht. Hinsichtlich der Erfassung von Solarflächen steht die mangelnde Datenverfügbarkeit von Hyperspektraldaten einer deutschlandweiten Auswertung im Wege. Entsprechende Aufnahmen können momentan nur lokal über Befliegungen bereitgestellt werden. Gleiches gilt für die Modellierung des Mikroklimas, wobei in diesem Falle zudem technische Limitierungen bezüglich des operationellen Betriebs der erforderlichen Modellierungsprogramme eine flächendeckende Auswertung verhindern. Durch eine Weiterentwicklung der existierenden Methodik zur Erfassung der Wärmenetzpotenziale und den Einsatz weiterer fernerkundlicher Datenquellen scheint perspektivisch die flächendeckende Erstellung örtlicher Energiekonzepte auf einer einheitlichen Basis möglich. Doppelallokationen von knappen landwirtschaftlichen Flächen oder begrenzten Biomasseressourcen können so effizient vermieden werden. Durch ein entsprechend übergreifendes Konzept wird eine regionale und überregionale Harmonisierung der Aktivitäten einzelner Gemeinden erst ermöglicht. Die Methode erlaubt des Weiteren aussagekräftige Summenbildung aus den Energiekonzepten aller Gemeinden.

Auf der Grundlage des durchgeführten Vorhabens konnten zudem wichtige Erkenntnisse hinsichtlich des weiteren Forschungsbedarfs gewonnen werden. So ließ sich mit der vorliegenden Untersuchung nachweisen, dass eine automatisierte Erfassung des Wärmenetzpotenzials anhand der Auswertung von bundesweit verfügbaren Geobasisdaten möglich ist. Insbesondere konnten die Netzlängen aus den Straßenlängen und dem Straßenabstand jedes einzelnen Gebäudes ermittelt werden. Die neue Methodik bietet jedoch noch in mehrfacher Hinsicht Entwicklungspotenzial – sowohl was die Methodik als auch die qualitative Verbesserung und Erweiterung der bisherigen Datenbasis betrifft. Aus methodischer Sicht erscheinen die Verbesserung des Modells zur Bestimmung der Netzlängen, der Ausschluss von Gebieten mit sehr geringen Wärmedichten, die Untergliederung des Nahwärmepotenzials innerhalb einer Gemeinde in Gebiete mit höheren und geringeren Wärmedichten, die Berücksichtigung von Niedertemperaturprozesswärme zusätzlich zum Bedarf an Raumwärme und Warmwasser sowie die Überprüfung des derzeitigen Kostenansatzes für den Bau von Wärmeleitungen in innerstädtischen Bereichen sinnvoll. Durch eine Optimierung und Erweiterung der Datenbasis sind zudem eine verbesserte Güte der Modellierungen sowie effizientere Verarbeitungsschritte – etwa durch einen weiter erhöhten Automatisierungsgrad – zu erwarten. Wichtige Ziele sind hier die verbesserte Differenzierung des Gebäudebe-

stands (z.B. Wohngebäude und Nebengebäude), die verbesserte Charakterisierung des Volumens einzelner Gebäude, die robustere Bestimmung des mittleren Baualters der Einzelgebäude, die Integration des lokal vorhandenen Potenzials erneuerbarer Energien als Grundlage für einheitliche Energiekonzepte für Gemeinden sowie die Berücksichtigung raumordnerischer Gesichtspunkte und Transportentfernungen. Es ist davon auszugehen, dass die abgeleiteten Geoinformationen bzw. Geobasisdaten auch zahlreiche weitere Anwendungsfelder unterstützen können, so etwa die Typisierung des Siedlungsraums, stadtklimatologische Bewertungen, Infrastrukturplanungen, Lärm- und Emissionsmodellierungen oder Risikoanalysen sowie Krisen- und Katastrophenmanagement.

# Inhaltsverzeichnis

|  |            |
|--|------------|
| <b>Zentrale Inhalte und Ergebnisse.....</b>                                | <b>I</b>   |
| <b>Inhaltsverzeichnis .....</b>  | <b>VI</b>  |
| <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>   | <b>VII</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis .....</b>   | <b>IX</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>   | <b>X</b>   |
| <b>1 Motivation .....</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 Wärmenetze als Beitrag zu Klimaschutz und Energieeffizienz.....        | 1          |
| 1.2 Status der Wärmenetzversorgung in Deutschland .....                    | 6          |
| 1.3 Zielsetzung und Aufbau der Studie .....                                | 8          |
| <b>2 Wärmenetze.....</b>   | <b>12</b>  |
| 2.1 Aufbau und Funktionsweise .....  | 12         |
| 2.2 Bestimmung von Wärmenetzpotenzialen .....                              | 13         |
| 2.2.1 Konzepte und Methoden .....  | 13         |
| 2.2.2 Verfahren zur raumbezogenen Analyse.....                             | 15         |
| <b>3 Bundesweite Modellierung des Wärmenetzpotenzials .....</b>            | <b>19</b>  |
| 3.1 Räumliches Potenzialmodell .....                                       | 19         |
| 3.2 Datengrundlage.....  | 20         |
| 3.3 Regionalisierung des Wärmebedarfs .....                                | 25         |
| 3.3.1 Wohngebäude .....  | 26         |
| 3.3.2 Nichtwohngebäude.....  | 28         |
| 3.4 Analyse der Wärmeinfrastruktur .....                                   | 32         |
| 3.4.1 Extraktion der Gebäudegrundflächen.....                              | 33         |
| 3.4.2 Berechnung der Hauptverteilungs- und Hausanschlussleitungen .....    | 36         |
| 3.4.3 Baukosten von Wärmeleitungen .....                                   | 42         |
| 3.4.4 Hausübergabestationen und konventionelle Wärmebereitstellung.....    | 46         |
| 3.5 Bestimmung des Wärmenetzpotenzials.....                                | 48         |
| <b>4 Energiebezogene Analysen auf Quartiersebene .....</b>                 | <b>55</b>  |
| 4.1 Datengrundlagen.....   | 55         |
| 4.2 Fallstudien .....  | 60         |
| 4.2.1 Charakterisierung der Stadtstruktur .....                            | 60         |
| 4.2.2 Inventarisierung der Dachbegrünung .....                             | 68         |
| 4.2.3 Inventarisierung von Solarflächen .....                              | 69         |
| 4.2.4 Erfassung des Photovoltaikpotenzials.....                            | 71         |
| 4.2.5 Modellierung des quartiersbezogenen Wärmenetzpotenzials .....        | 72         |
| 4.2.6 Modellierung Mikroklima.....   | 79         |
| <b>5 Fazit.....</b>  | <b>83</b>  |
| 5.1 Resultate der bundesweiten Analyse des Wärmenetzpotenzials .....       | 83         |
| 5.2 Machbarkeit quartiersbezogener Potenzialsanalysen auf Bundesebene..... | 84         |
| 5.3 Forschungsbedarf und Handlungsempfehlungen .....                       | 91         |
| <b>6 Quellenverzeichnis .....</b>  | <b>94</b>  |
| <b>Anhang .....</b>  | <b>100</b> |
| A. Tabellen.....   | 100        |
| B. Abbildungen .....   | 100        |

# Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1-1: Entwicklung des Energieeinsatzes zur Wärmebereitstellung .....  | 3  |
| Abbildung 1-2: Struktur der erneuerbaren Energien zur Deckung des Wärmebedarfs .....   | 4  |
| Abbildung 1-3: Entwicklung der Anschlusswerte und Trassenlängen für Fernwärme in den ABL und NBL .....   | 7  |
| Abbildung 2-1: Prinzip und Aufbau eines Nahwärmesystems .....  | 13 |
| Abbildung 3-1: Schematischer Ablauf der bundesweiten Modellierung des Wärmenetzpotenzials .....  | 20 |
| Abbildung 3-2: Struktur und Inhalte der Geodaten von Infas .....   | 23 |
| Abbildung 3-3: Mittlere Gradtagzahl je Gemeinde .....  | 25 |
| Abbildung 3-4: Regionalisierter Wärmebedarf pro Gemeinde .....   | 30 |
| Abbildung 3-5: Regionalisierter Wärmebedarf pro Gemeinde bezogen auf die Siedlungsfläche .....   | 31 |
| Abbildung 3-6: Regionalisierter Wärmebedarf pro Gemeinde bezogen auf die Einwohnerzahl .....   | 32 |
| Abbildung 3-7: Verarbeitungsschritte der automatisierten Gebäudeextraktion .....   | 34 |
| Abbildung 3-8: Identifizierung und Eliminierung falscher Gebäudeobjekte aus dem Ergebnis der Gebäudeextraktion unter Nutzung von ATKIS-Daten .....                                   | 35 |
| Abbildung 3-9: Berechnung der Länge von Hauptverteilungs- und Hausanschlussleitungen .....   | 37 |
| Abbildung 3-10: Berechnung der Euklidischen Distanz .....  | 38 |
| Abbildung 3-11: Leitungslängen in Bezug zu erschlossenen Gebäuden .....  | 39 |
| Abbildung 3-12: Längen der Anschlussleitung pro Gebäude .....  | 40 |
| Abbildung 3-13: Längen der Hauptverteilungsleitung pro Gebäude .....   | 41 |
| Abbildung 3-14: Gegenüberstellung von Wärmebedarf und berechneter Länge der Wärmenetze .....   | 42 |
| Abbildung 3-15: Baukosten von Wärmeleitungen .....   | 44 |
| Abbildung 3-16: Baukosten von Wärmeleitungen pro Trassenmeter .....  | 46 |
| Abbildung 3-17: Investitionskosten pro Gebäude .....   | 48 |
| Abbildung 3-18: Ermitteltes Wärmenetzpotenzial der Gemeinden in Deutschland .....  | 50 |
| Abbildung 3-19: Wärmenetzpotenzial kategorisiert für die siedlungsstrukturellen Kreistypen des BBSR .....  | 51 |
| Abbildung 3-20: Ermitteltes Wärmenetzpotenzial der Gemeinden in Deutschland ohne Berücksichtigung der Kosten einer konventionellen Wärmebereitstellung .....                         | 53 |
| Abbildung 3-21: Wärmenetzpotenzial kategorisiert für die siedlungsstrukturellen Kreistypen des BBSR ohne Berücksichtigung der Kosten einer konventionellen Wärmebereitstellung ..... | 54 |
| Abbildung 4-1: Lage und Charakteristik des Untersuchungsgebiets für die Quartiersstudien im Gebiet um den Münchner Ostbahnhof .....  | 56 |
| Abbildung 4-2: Ausschnitt einer Ikonos-Aufnahme vom Untersuchungsgebiet um den Ostbahnhof in München .....   | 58 |
| Abbildung 4-3: HyMap-Aufnahme vom Untersuchungsgebiet um den Münchner Ostbahnhof in Falschfarben-Darstellung .....   | 59 |



|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 4-4: Digitales Oberflächenmodell basierend auf Daten der HRSC Kamera .....  | 60  |
| Abbildung 4-5: Ablaufdiagramm der Gebäudeextraktion aus Fernerkundungsdaten.....  | 61  |
| Abbildung 4-6: Ergebnis der Gebäudeextraktion (rot) aus Fernerkundungsdaten .....   | 62  |
| Abbildung 4-7: Landbedeckungsklassifikation, erstellt über kombinierte Auswertung von DOM-<br>Informationen und multispektralen Satellitenbilddaten .....             | 63  |
| Abbildung 4-8: Perspektivische Ansicht eines 3D-Stadtmodells, das über eine kombinierte<br>Auswertung von DOM-Daten und Ikonos-Satellitenaufnahmen erstellt wurde ... | 63  |
| Abbildung 4-9: Automatisiert erstellte Stadtstrukturtypenklassifikation .....   | 65  |
| Abbildung 4-10: Ermittelter Bebauungsgrad [%] für die Umgebung des Ostbahnhofs in München ...   | 66  |
| Abbildung 4-11: Geschossflächendichte im Untersuchungsgebiet.....   | 67  |
| Abbildung 4-12: Grünanteil [%] pro Baublock .....   | 68  |
| Abbildung 4-13: Mittels fernerkundlicher Verfahren erfasste Dachbegrünung im Bereich des<br>Münchner Ostbahnhofs.....   | 69  |
| Abbildung 4-14: Identifizierung von Solaranlagen auf Dächern.....   | 70  |
| Abbildung 4-15: Mittlere Dachneigung .....  | 71  |
| Abbildung 4-16: Exemplarische Ermittlung der solaren Einstrahlung pro Gebäude [kWh m <sup>-2</sup> Tag <sup>-1</sup> ] für<br>den Monat Juni .....                    | 72  |
| Abbildung 4-17: Typisierter Gebäudebestand .....  | 75  |
| Abbildung 4-18: Wärmebedarf im Stadtgebiet Münchens .....   | 76  |
| Abbildung 4-19: Erfasste Gebäude innerhalb der Baublöcke sowie vereinfachte Kategorisierung von<br>Gebäudetypen .....   | 77  |
| Abbildung 4-20: Konzept zur differenzierten Berechnung von Anschlussleitungen für verschiedene<br>Gebäudetypen .....  | 78  |
| Abbildung 4-21: Quartierbezogenes Wärmenetzpotenzial berechnet für das Stadtgebiet Münchens<br>.....  | 79  |
| Abbildung 4-22: Oberflächentemperaturen in München am späten Vormittag des 26. Juni 2007 .....  | 80  |
| Abbildung 4-23: Simulierte Lufttemperatur und Luftfeuchte von ausgewählten Baublöcken in<br>Obergiesing für drei Szenarien .....                                      | 82  |
| Abbildung B I: Regionalisierter Wärmebedarf der Wohngebäude pro Gemeinde. ....  | 100 |
| Abbildung B II: Wärmedichte - Regionalisierter Wärmebedarf der Wohngebäude pro Gemeinde<br>bezogen auf Siedlungsfläche.....   | 101 |
| Abbildung B III: Regionalisierter Wärmebedarf der Wohngebäude pro Gemeinde bezogen auf<br>Einwohner. ....   | 101 |
| Abbildung B IV: Regionalisierter Wärmebedarf der Nichtwohngebäude pro Gemeinde. ....  | 102 |
| Abbildung B V: Wärmedichte - Regionalisierter Wärmebedarf der Nichtwohngebäude pro Gemeinde<br>bezogen auf Siedlungsfläche.....                                       | 102 |
| Abbildung B VI: Regionalisierter Wärmebedarf der Nichtwohngebäude pro Gemeinde bezogen auf<br>Einwohner. ....   | 103 |

# Tabellenverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| Tabelle 3-1: Wohngebäudebestand der BRD 2008 (StJb, 2010) und Aufteilung der Mehrfamilienhäuser (MFH) in kleine (KMH) und große (GMH) ..... | 27  |
| Tabelle 3-2: Wärmebezugs- und Raumwärmebedarfswerte in Abhängigkeit von Gebäudetyp und -alter.....  | 28  |
| Tabelle 3-3: Anzahl und Wärmebedarf (Nutzwärme einschließlich Warmwasser) der Nichtwohngebäude für Deutschland .....                        | 29  |
| Tabelle 3-4: Konventionelle Investitionskosten (Heizkessel für Öl / Gas) in Abhängigkeit des Gebäudetyps. ....                              | 47  |
| Tabelle 4-1: Technische Daten des Ikonos-Systems.....   | 57  |
| Tabelle 4-2: Anteile der Gebäudetypen an unterschiedlichen Siedlungstypen .....   | 74  |
| Tabelle 4-3: Volumenspezifischer Raumwärmebedarf. ....  | 76  |
| Tabelle 5-1: Zusammenfassende Bewertung der Machbarkeit quartiersbezogener Potenzialsanalysen auf Bundesebene. ....                         | 89  |
| Tabelle A I: Alternative Kennzahlen zum volumenspezifischen Raumwärmebedarf.....  | 100 |

# Abkürzungsverzeichnis

|          |   |
|----------|---|
| ABL      | Alte Bundesländer   |
| AdV      | Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland |
| AGFW     | Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft e.V.                                |
| ALKIS    | Amtliches Liegenschaftskataster-Informationssystem  |
| ATKIS    | Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem                               |
| ALK      | Automatisierte Liegenschaftskarte   |
| ALS      | Luftgestütztes Laserscanning (Airborne Laser-Scanning)                                    |
| BKG      | Bundesamt für Kartographie und Geodäsie   |
| BMU      | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit                           |
| BRD      | Bundesrepublik Deutschland  |
| CCD      | Charged Coupled Device  |
| DBA      | Digitale Bildanalyse  |
| DESTATIS | Statistisches Bundesamt Deutschland   |
| DFD      | Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum des DLR  |
| DLM      | Digitales Landschaftsmodell   |
| DN       | Nennweite   |
| DLR      | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  |
| DOM      | Digitales Oberflächenmodell   |
| DTK25-V  | Digitale Topographische Karte 1:25 000 (alte Kartengrafik)                                |
| DTK5     | Digitale Topographische Karte 1:5 000   |
| DTK10    | Digitale Topographische Karte 1:10 000  |
| DTK50    | Digitale Topographische Karte 1:50 000  |
| DTK100   | Digitale Topographische Karte 1:100 000   |
| DTK200   | Digitale Topographische Karte 1:200 000   |
| DGK5     | Deutsche Grundkarte 1:5000  |
| DSK      | Digitale Stadtkarte   |
| DWD      | Deutscher Wetterdienst  |
| EFH      | Einfamilienhaus   |

|         |   |
|---------|---|
| EUSI    | European Space Imaging  |
| EVU     | Energieversorgungsunternehmen                                       |
| FVU     | Fernwärmeversorgungsunternehmen                                     |
| GFD     | Geschossflächendichte   |
| GFZ     | Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam                              |
| GIS     | Geographisches Informationssystem                                   |
| GMH     | Große Mehrfamilienhaus  |
| HA      | Hausanschluss   |
| HRSC-AX | High Resolution Stereo Camera – Airborne Extended                   |
| IEKP    | Integriertes Energie- und Klimaprogramms der Bundesregierung        |
| KMH     | Kleine Mehrfamiliengebäude  |
| KWK     | Kraft-Wärme-Kopplung  |
| MAP     | Marktanreizprogramm   |
| MFH     | Mehrfamilienhaus  |
| MWth    | Megawatt thermisch  |
| NBL     | Neue Bundesländer   |
| NDVI    | Normalized Difference Vegetation Index (Vegetationsindex)           |
| NIR     | Near Infrared, Aufnahmekanal im Nahen Infrarot                      |
| NWG     | Nichtwohngebäude  |
| UBA     | Umweltbundesamt   |
| StJB    | Statistisches Jahrbuch  |
| SuV     | Siedlungs- und Verkehrsfläche, Statistische Kenngröße und Indikator |
| SVM     | Support Vector Machines, Regressions- und Klassifikationsverfahren  |
| VBA     | Visual Basic for Applications                                       |
| TM      | Thematic Mapper, Sensor des Landsat-Satelliten                      |
| ZFH     | Zweifamilienhaus  |

# 1 Motivation

Nachdem auf europäischer Ebene die Weichen für eine gemeinsame Klima- und Energiepolitik gestellt wurden, hat die Bundesregierung zentrale Richtungsentscheidungen dieser Initiative aufgegriffen und in Form eines "Integrierten Energie- und Klimaprogramms" (IEKP) verankert. Das Maßnahmenprogramm des IEKP zielt darauf ab, auf nationaler Ebene eine moderne, sichere und klimaverträgliche Energieversorgung zu etablieren und gleichsam ehrgeizige Maßnahmen für einen intelligenten und effizienten Klimaschutz festzulegen. Eine zentrale Säule für eine zukunftsfähige Energieversorgung, die sowohl der Endlichkeit fossiler Rohstoffe als auch den bedrohlichen Auswirkungen eines zunehmenden Ausstoßes von Klimagasen Rechnung trägt, stellt der Einsatz von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien und zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) dar. Die Primärenergie zur Umsetzung von KWK kann dabei unter Nutzung regenerativer Energieträger oder aus fossilen Brennstoffen bezogen werden.

## 1.1 Wärmenetze als Beitrag zu Klimaschutz und Energieeffizienz

Erneuerbare Energien und KWK sind essentielle Bausteine für eine unabhängige, effiziente und klimaverträgliche Energieversorgung. In einer für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) erstellten Leitstudie (Nitsch & Wenzel, 2009) wird die Möglichkeit einer nachhaltigen Anpassung des deutschen Energiesystems bis zum Jahr 2050 aufgezeigt. Laut dieser Studie soll das im Jahr 2050 genutzte Wärmepotenzial aus erneuerbaren Energien zu knapp 60 % auf Wärmenetzen beruhen. Im Wärmebereich ist hierzu ein erheblicher Zuwachs bei der leitungsgebundenen Wärmeversorgung erforderlich. Bis zum Jahr 2050 soll sich die über Netze verteilte Wärme gegenüber dem heutigen Stand verdreifachen. Der Anteil am Wärmemarkt soll dabei unter Berücksichtigung von verbesserter Wärmedämmung und sonstigen Effizienzmaßnahmen von etwa 12 % auf 56 % steigen. Dieses Ziel erscheint sehr anspruchsvoll, ist aber in einigen skandinavischen Ländern bereits erreicht (Nast, 2004). Auch in Deutschland ist daher der Ausbau von Wärmenetzen - insbesondere in Form effizienter KWK-Anlagen – ein unverzichtbarer Baustein, um eine nachhaltige Energieversorgung zu erreichen (Fischedick et al., 2007).

Erklärtes Ziel der Bundesregierung ist die Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 % gegenüber des Wertes von 1990, bei einer gleichzeitigen Steigerung des Beitrags erneuerbarer Energien an der gesamten Energieversorgung auf rund 50 %. Zur Erreichung dieser Ziele ist ein struktureller Wandel der Wärmeversorgung unabdingbar. Zu den Kernelementen einer solchen Umstrukturierung zählen der substanzielle Ausbau erneuerbarer Energien, eine erhebliche Erhöhung der Nutzungseffizienz der bestehenden und zukünftigen



Systeme sowie eine verbesserte Umwandlungseffizienz durch den Ausbau von KWK und den Ersatz von Altkraftwerken durch effizientere Anlagen.

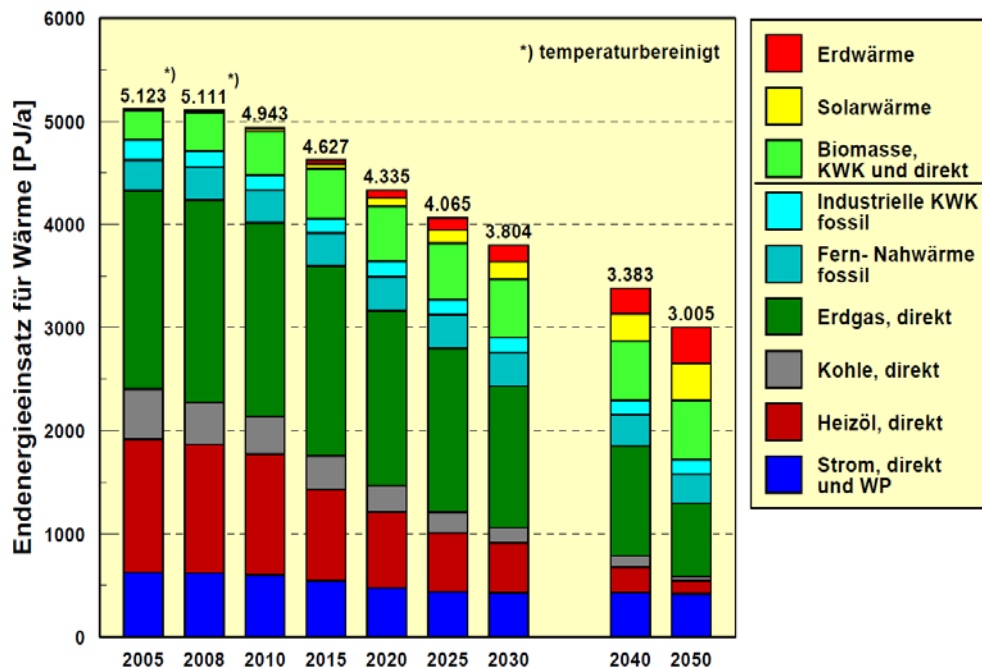
Bezogen auf das Jahr 2008 wurden 55 % der genutzten Endenergie in Form von Wärmeenergie umgesetzt und damit 40 % der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen erzeugt (Nitsch & Wenzel, 2009). Unter Endenergie ist in diesem Kontext derjenige Teil der Primärenergie zu verstehen, der den Verbrauchern nach Abzug von Umwandlungs- und Transportverlusten zur Verfügung steht (Marquardt, 2004). Anteilsmäßig entfallen 53 % der verbrauchten Wärmeenergie auf die Raumheizung, 30 % werden in Form von Industrie- und Prozesswärme umgesetzt, während der verbleibende Anteil für den Warmwasser- und Prozesswärmebedarf der Haushalte und Kleinverbraucher benötigt wird.

Mit Blick auf die notwendigen Anpassungen der Wärmeversorgung bis zum Jahr 2050 legt das aktuelle Leitszenario des BMU dar, dass die Nachfrage nach Wärme um 15 % sinken muss. Die benötigte Reduzierung des spezifischen Heizwärmebedarfs beläuft sich auf 25% des gegenwärtigen Niveaus. Für das Jahr 2050 wird eine Absenkung der Wärmenachfrage um 42 % bezogen auf den heutigen Stand vorausgesetzt, bei einer gleichzeitigen Verringerung des spezifischen Heizwärmebedarfs um 40%. Diese Berechnungen implizieren bei einem angenommenen Zuwachs der beheizten Wohnfläche von 30 % bis zum Jahr 2050 eine vollständige energetische Sanierung aller Bestandsgebäude. Bedingt durch eine Zunahme der Wohnfläche dürfte die Verringerung der Energienachfrage für Raumwärme etwas geringere Senkungsraten aufweisen – ausgewiesen werden 82 % des Wertes von 2008 für das Jahr 2020 und 50 % für den Stand 2050.

Da sich bei der Ausweitung erneuerbarer Energien aus strukturellen Gründen nur begrenzte Zuwachsraten erreichen lassen, gewährleistet erst die starke Verminderung der Wärmenachfrage die Erbringung hoher Anteile erneuerbarer Energien im Raumwärmebereich. So können etwa Tiefengeothermie und solare Großanlagen kurzfristig nur verhältnismäßig geringe Beiträge des Raumwärmebedarfs abdecken, da ein verstärkter Einsatz dieser Technologien den Ausbau von Nahwärmenetzen voraussetzt. Gelingt ein systematischer Ausbau von Nahwärmenetzen - insbesondere im Altbaubestand -, ist bis zum Jahr 2050 ein Deckungsanteil der erneuerbaren Energien am Raumwärmebedarf von 70 % möglich. Der Anteil der Nahwärme an der Deckung des Prozesswärmebedarfs wird, aufgrund des hier meist erforderlichen hohen Temperaturniveaus, sehr viel geringer bleiben. Neben dem gesteigerten Einsatz erneuerbarer Energien ist der Beitrag von Wärme aus KWK-Anlagen für eine klimagerechte und effiziente Gestaltung des Wärmesektors unabdingbar. So muss sich der Anteil von Wärme aus KWK-Anlagen von gegenwärtig 12 % auf 25 % im Jahr 2050 erhöhen.

Abbildung 1-1 und Abbildung 1-2 geben einen Überblick über die prognostizierte Entwicklung des zur gesamten Wärmebereitstellung (Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme) erfor-

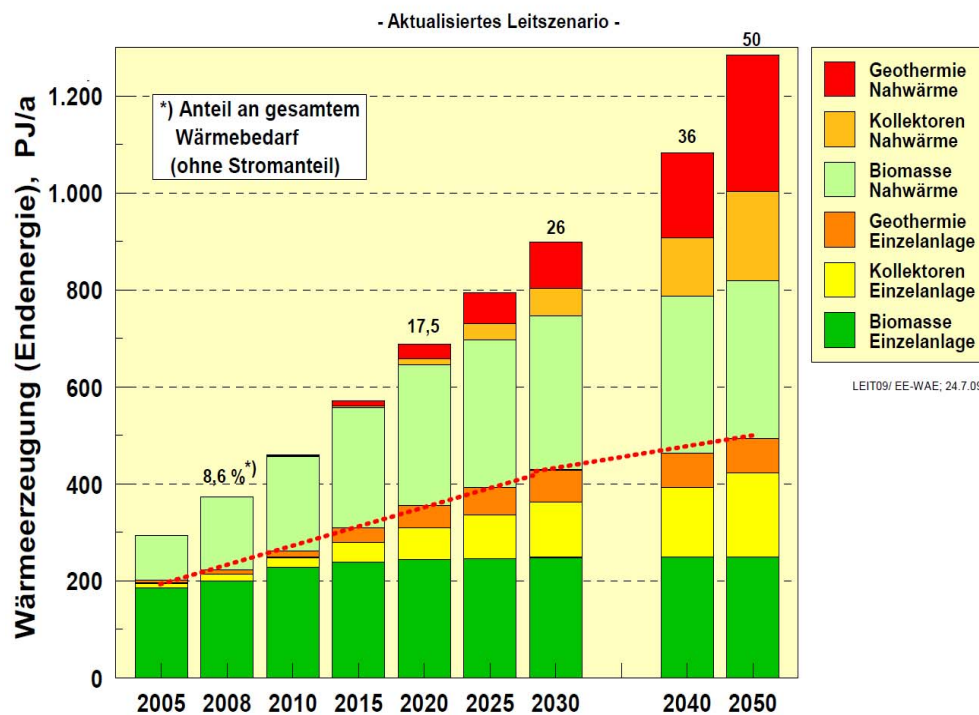
derlichen Energieeinsatzes sowie der Struktur der Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien in der Bundesrepublik Deutschland (BRD). Ferner führt Abbildung 1-2 vor Augen, welche Herausforderungen mit den aufgeführten Ausbaustrategien einhergehen. Aktuell wird der Beitrag der erneuerbaren Energien zu 60 % über Einzelanlagen generiert. Das Potenzial dieser Anlagen ist jedoch vergleichsweise limitiert, weshalb sich auf dieser Basis nur ein relativ niedriges Wachstum erzielen lässt (gestrichelte Linie). Deutlich höher muss der Zuwachs bei Nahwärmanlagen liegen – hier muss ein Anstieg des Anteils auf bis zu 60 % erfolgen. Allerdings muss der Beitrag der netzgebundenen Wärmeversorgung dazu auf das achtfache des heutigen Umfangs gesteigert werden. Diese Dimension veranschaulicht eindrucksvoll die Notwendigkeit und den Umfang der erforderlichen strukturellen Anpassungen bzw. des Ausbaus von Wärmenetzen.



**Abbildung 1-1: Entwicklung des Energieeinsatzes zur Wärmebereitstellung auf Basis eines Leitszenarios zur Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung** (Nitsch & Wenzel, 2009): Die Nachfrage nach Wärme sinkt bis 2020 mit 4335 PJ/a um 15 % des heutigen Wertes und bis 2050 um rund 40 %. Der Beitrag der erneuerbaren Energien steigt bis 2020 auf 16 % (ohne Stromanteil an der Wärmeversorgung auf 17,5 %) und bis 2030 auf gut 26 %. In 2050 wird davon ausgegangen, dass die Hälfte der dann noch verbleibenden Nachfrage nach Wärmeenergie in Höhe von 3000 PJ/a mittels erneuerbarer Energien bereitgestellt werden kann. Der Beitrag netzgebundener Wärme (Fern- und Nahwärme einschließlich Objekt-KWK; ohne industrielle KWK) steigt von derzeit 370 PJ/a bis 2020 auf 560 PJ/a und längerfristig noch auf knapp 1000 PJ/a. An fossilen Brennstoffen werden in 2050 nur noch 1300 PJ/a benötigt, was eine Verringerung von rund 70% des heutigen fossilen Einsatzes entspricht.

Speziell Nahwärme weist eine Reihe von Vorzügen auf, die sie für eine nachhaltige Wärmeversorgung nahezu unverzichtbar macht. Die technisch-ökonomischen Vorteile von Nahwärme basieren auf der Zusammenfassung mehrerer Verbraucher zu einem Großabnehmer. Mit diesem Prinzip lassen sich Wärmeherzeugungstechniken einsetzen, die für kleine Abnehmer entweder zu teuer oder technisch schwer realisierbar sind (Nast, 2004). Auf die schwer

vorhersagbare Kostenentwicklung der verschiedenen Energieträger kann mit einer zentralen Heizstation zudem besser reagiert werden als mit individuellen Lösungen für einzelne Gebäude, da für eine Brennstoffumstellung nur ein großer Heizkessel und nicht eine Vielzahl von kleinen Kesseln getauscht werden muss (Nast, 2004; Schillings et al., 2007). Im Folgenden werden verschiedene, nachhaltige Energieerzeugungstechniken vorgestellt, deren optimaler Einsatz nur durch ein ergänzendes Wärmenetz gewährleistet wird.



**Abbildung 1-2: Struktur der erneuerbaren Energien zur Deckung des Wärmebedarfs auf Basis des Leitszenarios von Nitsch & Wenzel (2009).** Der heutige Beitrag der erneuerbaren Energien besteht mit insgesamt 220 PJ/a (davon 200 PJ/a Biomasse) zu knapp 60 % aus Einzelanlagen mit dominierendem Anteil von Biomasse-Einzelfeuerungen. In diesem Segment ist eine Steigerung von Solarkollektor- und Erdwärmepumpen anzunehmen, allerdings sind die Potenziale bei Einzelanlagen begrenzt. Der absolute Beitrag von Einzelanlagen auf Basis erneuerbarer Energien wächst dadurch bis 2050 lediglich um das 2,2-fache des heutigen Werts (gestrichelte Linie) auf insgesamt 490 PJ/a. Deutlich stärker steigt die Wärmebereitstellung mittels Nahwärmanlagen und zwar von derzeit ca. 150 PJ/a auf 330 PJ/a in 2020 und auf 790 PJ/a in 2050 an. Zu diesem Zeitpunkt dominieren Nahwärmanlagen mit 60 % Anteil den Wärmemarkt der erneuerbaren Energien.

Die effizienteste Verbrennung und Umwandlung von fossilen Energieträgern in Strom erfolgt in Großkraftwerken mit hohen Wirkungsgraden und vergleichsweise geringen Schadstoffemissionen. Die bei der Umwandlung freigesetzte thermische Energie (Abwärme) kann den Verbrauchern nur durch ein Wärmenetz zur Verfügung gestellt werden. Eine technische Skalierung von KWK-Anlagen zur Einzelobjektversorgung ist möglich (Eickmeier et al., 2006), allerdings weisen größere Anlagen, die mehrere Verbraucher versorgen, bessere elektrische Wirkungsgrade und vergleichbar geringe Kosten auf (Nast, 2004). Die Nutzung größerer Abwärmemengen aus industriellen Prozessen ist ohne ein Nahwärmenetz zudem häufig nicht möglich.

Solarthermische Anlagen beschränken sich üblicherweise auf die Wärmeversorgung einzelner Gebäude. Die Kollektoren werden meist auf Gebäudedächern mit südlicher Exposition installiert. Auf diese Weise lässt sich Brauchwasser besonders in den Sommermonaten günstig erwärmen. Gemessen am jährlichen Wärmebedarf eines Gebäudes ist aus wirtschaftlicher Perspektive allerdings nur ein solarer Deckungsanteil derartiger Anlagen von unter 20 % sinnvoll. Ein höherer Deckungsanteil ist lediglich mit einem entsprechend großen Wärmespeicher zu realisieren. Zentrale Solaranlagen, mit denen mehrere Gebäude über ein Nahwärmenetz versorgt werden können, sind, sowohl hinsichtlich der Kosten für die Kollektoren als auch für die des Wärmespeichers, deutlich günstiger zu installieren. Zudem ermöglichen große Wärmespeicher, die langsamer auskühlen als kleine, eine saisonale Wärmespeicherung (Fischedick et al., 2007).

Die Möglichkeiten zur Nutzung von Biomasse zur leitungsgebundenen Wärmebereitstellung sind eng verknüpft mit der Verschiedenartigkeit der Produkte, die aus Biomasse erzeugt werden können. So kann Biomasse in nahezu natürlicher oder aber in weiterverarbeiteter Form eingesetzt werden. Grundsätzlich bietet eine Aufbereitung der Biomasse vielseitigere Einsatzmöglichkeiten und Nutzungsbedingungen. In diesem Zusammenhang werden Anlagen, die eine direkte Biomassenutzung ohne intensive Aufbereitungs- und Umwandlungsprozesse ermöglichen, von Anlagentechnologien unterschieden, die ursprünglich für den Einsatz fossiler Brennstoffe konzipiert wurden (Blockheizkraftwerke), Biomasse allerdings nach vorheriger Aufbereitung nutzen können. Nahwärmenetze erweitern somit die Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse, da etwa problematische Brennstoffe wie Stroh oder Rindenholz nur in großen Anlagen mit einem vertretbaren wirtschaftlichen Aufwand umweltverträglich verarbeitet werden können. Auch der Einsatz von KWK ist bei der Nutzung von Biomasse als Brennstoff technisch realisierbar und ökologisch vorteilhaft. Allerdings müssen KWK-Anlagen im Sinne ihrer Leistung sehr groß dimensioniert sein, um sie mit festen Brennstoffen wirtschaftlich betreiben zu können (Nast, 2004).

Neben Biomasse stellt auch Erdwärme eine grundlastfähige, erneuerbare Energiequelle dar. Energie aus geothermischen Bohrungen kann zur reinen Wärmebereitstellung dienen, aber auch zusätzlich zur Stromerzeugung genutzt werden. Die Temperaturen im Erduntergrund nehmen idealtypisch um 30 K pro 1000 m zu. Für die Erschließung einer geothermischen Wärmequelle zur Wärmebereitstellung ist daher eine Bohrtiefe von mindestens 2000 m notwendig. Um Strom zu erzeugen sind aus technischer Sicht höhere Temperaturen und damit größere Bohrtiefen von mindestens 4000 m empfehlenswert, wenngleich aufgrund von Wirtschaftlichkeitskriterien gegenwärtig eine maximale Tiefe von 3000 m anzusetzen ist (Kayser & Kaltschmitt, 1998). Derartige Bohrtiefen sind mit erheblichen Kosten verbunden und können erst durch eine Erschließung entsprechend großer Wärmemengen wirtschaftlich betrieben werden. Die gewonnenen Wärmemengen lassen sich wiederum häufig nur durch ein

Nahwärmenetz einer hinreichend großen Menge an Abnehmern bereitstellen. Deshalb schreiben Fishedick et al. (2007) der Geothermie als nachhaltige Energieressource lediglich ein geringes Nutzungspotenzial zu, sofern nicht gleichzeitig ein Ausbau von Nahwärmenetzen erfolgt. Dies verdeutlicht erneut die strukturelle Bedeutung von Nahwärme für zukünftige Beiträge erneuerbarer Energien zum Wärmemarkt.

## 1.2 Status der Wärmenetzversorgung in Deutschland

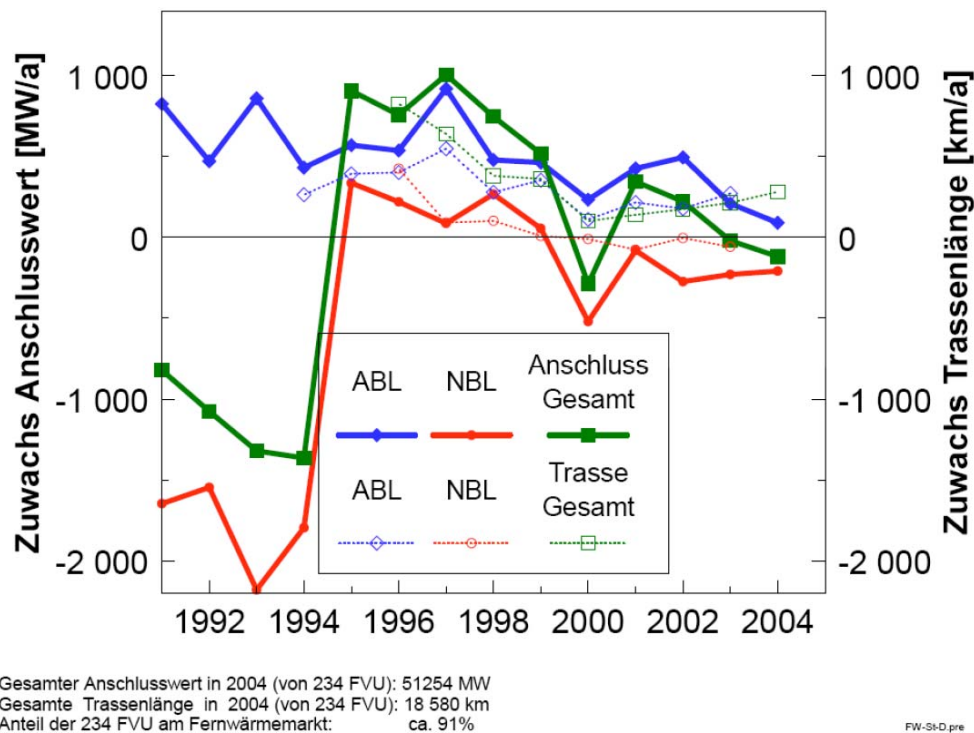
Im Allgemeinen erweist sich die statistische Charakterisierung der netzgebundenen Wärmennutzung als überaus schwierig, weshalb diesbezüglich bislang keine einheitlichen Angaben vorliegen. Fishedick et al. (2007) haben die Entwicklung und den Stand der Fernwärmeversorgung anhand der Haupt- und Schnellberichte der Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft e.V. (AGFW) analysiert. Dabei geben sie – u.a. unter Bezug auf Abbildung 3-1 – folgende Zusammenfassung der Situation:

Die Anschlusswerte für Fernwärme in den neuen Bundesländern (NBL) sind rückläufig und stagnieren mit Blick auf die Entwicklung in Gesamtdeutschland. Dies liegt darin begründet, dass die Anschlusswerte in den alten Bundesländern (ABL) im Jahr 2004 noch ein sehr geringes Wachstum von 0,2 % des gesamten Anschlusswertes der ABL aufweisen. Beim Blick auf diese Zahlen und Trends ist jedoch zu beachten, dass der Anteil der Fernwärme am gesamten Wärmemarkt in den NBL weiterhin erheblich über den Werten der ABL liegt. Die dargestellten Zuwächse sind der Saldo der von den Fernwärmeversorgungsunternehmen (FVU) berichteten Anschlusswertminderungen und Anschlusswerterhöhungen, wobei sich die Anschlusswerte seit 1997 durch Abriss oder Netzstilllegung jährlich um 0,7 % bis 0,9 % vermindert haben. Dieser Trend wird begleitet von einer jährlichen Anschlusswertminderung bei bestehenden Gebäuden zwischen 0,7 % und 1,0 % – eine Entwicklung, die unter anderem auf eine verbesserte Wärmedämmung zurückzuführen ist. Vornehmlich aufgrund von Netzverdichtungen in bereits mit Fernwärme versorgten Gebieten steht dem Rückgang der Anschlusswerte jedoch eine Steigerung der Neuanschlüsse von Gebäuden gegenüber. Daher ist die mittlere jährliche Wärmeabnahme je Hausanschluss (HA) vom Jahr 2000 zum Jahr 2004 von 172 kWh/HA auf 167 kWh/HA gesunken.

Eine optimierte Wärmedämmung wirkt sich in der Weise aus, dass sich die Ausnutzungsdauer der Anschlussleistung oder aber der Anschlusswert des betroffenen Gebäudes verringert. Die Betrachtung der Ausnutzungsdauer ist allerdings nur dann aussagekräftig, wenn eine temperaturbezogene Bereinigung der entsprechenden Werte erfolgt, da die Ausnutzungsdauer neben der Wärmedämmung auch von der mittleren Umgebungstemperatur in der Heizsaison des betrachteten Zeitraums abhängig ist. Eine entsprechende Auswertung in den NBL zeigte eine klare Abnahme der Ausnutzungsdauer. Dies wird dabei weniger auf



eine verbesserte Wärmedämmung als vielmehr auf eine verbesserte Zuordnung der Heizkosten auf die einzelnen Fernwärmekunden gemäß dem tatsächlichen Verbrauch zurückgeführt. Für die ABL offenbart eine temperaturbereinigte Analyse tendenziell eine Zunahme. Abbildung 1-3 verdeutlicht zudem, dass der Zuwachs bei den Trassenlängen abnimmt, wobei in den NBL mehr vorhandene Leitungen stillgelegt werden als neue hinzukommen. Auch in den ABL zeichnet sich eine tendenzielle Abnahme beim Zubau von Fernwärmeleitungen ab, dieser fällt im Gegensatz zu den Anschlusswerten jedoch weit weniger deutlich aus.



**Abbildung 1-3: Entwicklung der Anschlusswerte und Trassenlängen für Fernwärme in den ABL und NBL** (Jahreshauptberichte der AGFW (2004) aus Fishedick et al., 2007). Hervorzuheben ist der Trend leicht rückläufiger bzw. stagnierender Anschlusswerte. Dies steht im Gegensatz zur erforderlichen Entwicklung von Wärmenetzen laut Leitszenario (Nitsch & Wenzel, 2009).

Mit Blick auf die Perspektiven der Fern- und Nahwärme zeigt sich nach Fishedick et al. (2007), dass die AGFW die kurz- und mittelfristigen Perspektiven der Fernwärmenutzung eher zurückhaltend bewertet, während die langfristigen Potenziale deutlich optimistischer eingeschätzt werden. Diese Entwicklung wird auf verschiedene Faktoren zurückgeführt. So sind zahlreiche Fernwärmeversorgungsunternehmen (FVU) auch im Strommarkt engagiert, weshalb ihr Fokus stärker auf der Liberalisierung und Entflechtung lag. Darüber hinaus ist die KWK-Gesetzgebung primär auf den Strombereich ausgerichtet, was die Stromkennzahlen erhöht, ohne jedoch Auswirkungen auf den Wärmemarkt zu haben. Ferner beeinflusst der CO<sub>2</sub>-Emissionshandel den Ausbau von Fernwärme negativ, was noch dadurch verstärkt wird, dass die wärmebezogenen Aspekte bereits in der Vergangenheit vernachlässigt wur-

den. Letztlich behindern auch kurze Abschreibungszeiten langfristige Überlegungen, die für eine Fernwärmenutzung von Vorteil wären. Dies liegt wohl auch daran, dass Fernwärme weiterhin nicht als eine moderne und zukunftsorientierte Versorgungsart angesehen wird. Demgegenüber wird die Nahwärme hinsichtlich ihrer zukünftigen Relevanz von den Energieversorgungsunternehmen (EVU) wesentlich positiver bewertet. So sehen lediglich 19 % ein Wachstum bei der traditionellen Fernwärme, während 56 % der EVU das Entwicklungspotenzial von Nahwärme als positiv einschätzen. Allerdings ist der Vorteil von Nahwärme außerhalb der dicht bebauten Stadtkerne stark von deutlich sinkenden Kosten für den Leitungsbau abhängig – eine Entwicklung, die nur 12 % der FVU für wahrscheinlich erachten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine klare Diskrepanz zwischen den Ausbaustrategien der Leitszenarien (vgl. Kap. 1.1) sowie der gegenwärtigen Situation bzw. der Einschätzung der zukünftigen Entwicklung, besteht. Vor diesem Hintergrund erscheint es daher umso bedeutender, eingehende Kenntnisse darüber zu erlangen, in welchen Regionen der Zubau von Wärmenetzen – insbesondere Nahwärme – ökonomisch am sinnvollsten erscheint.

### **1.3 Zielsetzung und Aufbau der Studie**

Wie zuvor aufgezeigt, ist der Ausbau der Nah- und Fernwärmeversorgung von besonderer Bedeutung für die Etablierung einer nachhaltigen und klimaverträglichen Energieversorgung. Vor diesem Hintergrund müssen Wärmenetze bei der notwendigen Umstrukturierung der Wärmeversorgung in Deutschland eine gewichtige Rolle spielen, um den aktuell noch vergleichbar geringen Anteil dieser Netze am Wärmemarkt im notwendigen Umfang zu steigern.

Ein zentrales Element zum effizienten Auf- und Ausbau von Wärmenetzen ist eine Bewertung der regionalen Potenziale zur Etablierung einer leitungsgebundenen Wärmeversorgung. Dies umfasst in erster Linie die Regionalisierung technischer Wärmenetzpotenziale auf Basis siedlungsstruktureller Merkmale, denn eine solche Regionalisierung stellt den Lückenschluss zwischen den vorliegenden Langfristszenarien und den raumstrukturellen Gegebenheiten dar.

Bislang war der räumliche Detaillierungsgrad von flächendeckenden und Regionen übergreifenden Analysen zum Wärmenetzpotenzial aufgrund der zur Verfügung stehenden Datengrundlage sowie Restriktionen bezüglich der Datenkosten beschränkt. Zudem basieren räumlich flächendeckende Potenzialanalysen für das gesamte Bundesgebiet derzeit auf vergleichsweise einfachen Grundannahmen und deutlich generalisierten Datensätzen. Räumliche Bezugsebene für verlässliche Auswertungen ist in der Regel die administrative Einheit von Landkreisen bzw. kreisfreien Städten. Dieses recht hohe räumliche Abstraktionsniveau

stellt eine klare Limitierung dar, welche die Aussagekraft und Verwertbarkeit – speziell mit Blick auf die Einbindung in Szenarien für das gesamte Bundesgebiet – erschwert.

Im Rahmen dieses Vorhabens wird daher über eine optimierte Kombination raumbezogener Datengrundlagen und Auswertetechniken eine bundesweite, räumlich und thematisch verbesserte Potenzialanalyse hinsichtlich des Aufbaus einer leitungsgebundenen Wärmeversorgung im Siedlungsraum durchgeführt. Zu diesem Zweck werden verschiedene Informationsebenen aus amtlicher Vermessung und räumlicher Statistik unter Nutzung spezieller Auswertetechniken der digitalen Bildanalyse und geographischen Informationsverarbeitung zusammengeführt und analysiert. Die Resultate dieser Modellierung werden dann gemeinde-scharf ausgegeben. Grundgerüst der Analysen bildet eine Methodik, die am DLR entwickelt wurde.

Neben dieser bundesweiten Bewertung des Wärmenetzpotenzials wird darüber hinaus am Fallbeispiel der Stadtregion München aufgezeigt, in welchem Umfang sich raumbezogene Analysen zum Wärmenetzpotenzial durch Einbeziehung höchstauflösender fernerkundlicher Informationen sowie kommerzieller Daten zum Gebäudebestand bis auf die räumliche Ebene von Quartieren präzisieren lassen. Zugleich wird demonstriert, inwieweit die verwendete Datenbasis die Erschließung weiterer, energierelevanter Anwendungsfelder ermöglicht.

Vor dem dargelegten Hintergrund verfolgt das Vorhaben drei zentrale Ziele:

- die bundesweite Modellierung des Wärmenetzpotenzials auf der räumlichen Ebene von Gemeinden unter Berücksichtigung der Lage einzelner Gebäude einschließlich des zugehörigen, näherungsweise ermittelten Wärmebedarfs.
- die Demonstration energierelevanter Raumanalysen auf Quartiersebene anhand von Fallstudien im Stadtgebiet Münchens.
- eine Bewertung der Möglichkeiten zur Umsetzung quartiersbezogener Potenzialanalysen im Kontext Klimaschutz und Energieeffizienz auf Bundesebene.

Die Modellierung des gemeindebezogenen Wärmenetzpotenzials für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland umfasst die Durchführung einer verbesserten Analyse bezüglich des Aufbaus von Wärmenetzen unter Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale. Die Optimierungen ergeben sich insbesondere aus der Integration und Auswertung aktueller bzw. räumlich und thematisch präziser Daten zu Art, Nutzung und Lage des Gebäudebestands sowie aus der Einbindung klimatischer Faktoren.

Die Demonstration energierelevanter Analysen zur siedlungsstrukturbezogenen Inventarisierung und Potenzialbewertung auf Quartiersebene wird anhand von Fallstudien aus dem Stadtgebiet Münchens durchgeführt. Dabei wird unter Einbeziehung fernerkundlicher Informationen (Satellitenaufnahmen, Höhendaten) und kommerzieller Daten zum Gebäudebe-

stand (Alter, Typus) aufgezeigt, welches Potenzial eine solche Datengrundlage zur Gebäude-, Siedlungs- und Raumstruktur hinsichtlich der Abschätzung des Wärmepotenzials und weiterer Anwendungsfelder im Kontext der Energieeffizienz und des Klimaschutzes im Gebäudebereich bietet. Hierfür sind beispielsweise die Charakterisierung der Stadtstruktur, die Erfassung von Dachbegrünung und Solarflächen, die Bewertung des Photovoltaikpotenzials sowie die Modellierung des quartiersbezogenen Wärmenetzpotenzials und der mikroklimatischen Situation zu nennen.

Abschließend wird unter Berücksichtigung der im Rahmen dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse ein Konzept erarbeitet, welches die Rahmenbedingungen hinsichtlich der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit, der erforderlichen Ressourcen und Verfügbarkeiten sowie des notwendigen Zeitrahmens zur bundesweiten Umsetzung quartiersscharfer Analysen zur Siedlungsstruktur und Gebäudecharakteristik skizziert. Durch solche Anwendungen könnte zukünftig die Erhebung und Aktualisierung einheitlich ermittelter Inventare und Potenziale erheblich erleichtert werden. So ließe sich eine Vielzahl wertvoller Informationen bereitstellen, die zur Umsetzung effizienter Strategien zur Steigerung der Energieeffizienz und Verbesserung des Klimaschutzes im Gebäudebereich benötigt werden. Darüber hinaus soll diese Studie Aufschluss darüber geben, welche der bisher mit hohem Aufwand terrestrisch erhobenen Daten sich zukünftig durch den Einsatz von Fernerkundungsdaten bzw. der Nutzung von fernerkundlichen Bildverarbeitungstechniken ersetzen lassen.

Die entsprechend der Ziele der Studie definierte Struktur des Vorhabens wird im Folgenden dargelegt. Nach einer Einführung in Motivation und Ziele der Studie (Kapitel 1) stellt Kapitel 2 die notwendigen Hintergrundinformationen zur Thematik von Wärmenetzen bereit. Im dritten Abschnitt wird die Entwicklung eines Regionalisierungsansatzes zur Ausweisung des lokalen Wärmenetzpotenzials auf Gemeindeebene erörtert. Dies beinhaltet die Modellierung der lokalen Wärmenachfrage und der zugehörigen infrastrukturellen Kosten zur Bewertung und Priorisierung von baulichen Arealen hinsichtlich einer leitungsgebundenen Wärmeversorgung. In die Modellierung gehen Daten aus dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS) zur Land- und Flächennutzung (Siedlungsflächen) sowie dem Verkehrswegenetz ein, aus der Digitalen Topographischen Karte 1:25.000 (DTK25-V) Informationen zur Gebäudegrundrissfläche. Zusätzlich werden generalisierte, teilweise auf kommerziellen Daten basierende Informationen zu Alter, Typ und Nutzung des Gebäudebestands sowie der klimatischen Situation integriert.

In Kapitel 4 werden anhand von Fallbeispielen aus dem Stadtgebiet Münchens räumlich höchstauflösende Informationen zur Gebäude-, Siedlungs- und Raumstruktur herangezogen und hinsichtlich der Abschätzung des Wärmepotenzials und weiterer Anwendungsfelder im Kontext der Energieeffizienz und des Klimaschutzes im Gebäudebereich bewertet. Dies umfasst die Bereitstellung einer konsistenten räumlichen Informationsbasis auf Grundlage von

hoch aufgelösten multispektralen Satellitendaten (Ikonos), Höheninformationen (HRSC-AX) und kommerziellen Daten zur Gebäudecharakterisierung auf Baublockebene (Infra-Geodaten). Zielanwendungen sind die Erfassung der Stadtstruktur (z.B. über Bebauungsgrad, Bauvolumen, Grünanteil und Grünvolumen), die Modellierung des Wärmenetz- und Photovoltaikpotenzials auf Baublockebene, die Inventarisierung von Solarflächen und begrünten Dächern sowie eine Modellierung der mikroklimatischen Gegebenheiten.

Im abschließenden fünften Kapitel erfolgen die zusammenführende Bewertung der Ergebnisse und eine Darstellung der Machbarkeit bundesweiter Analysen auf Quartiersebene unter Berücksichtigung der Datengrundlagen und -verfügbarkeit sowie des Zeit- und Kostenrahmens.



## 2 Wärmenetze

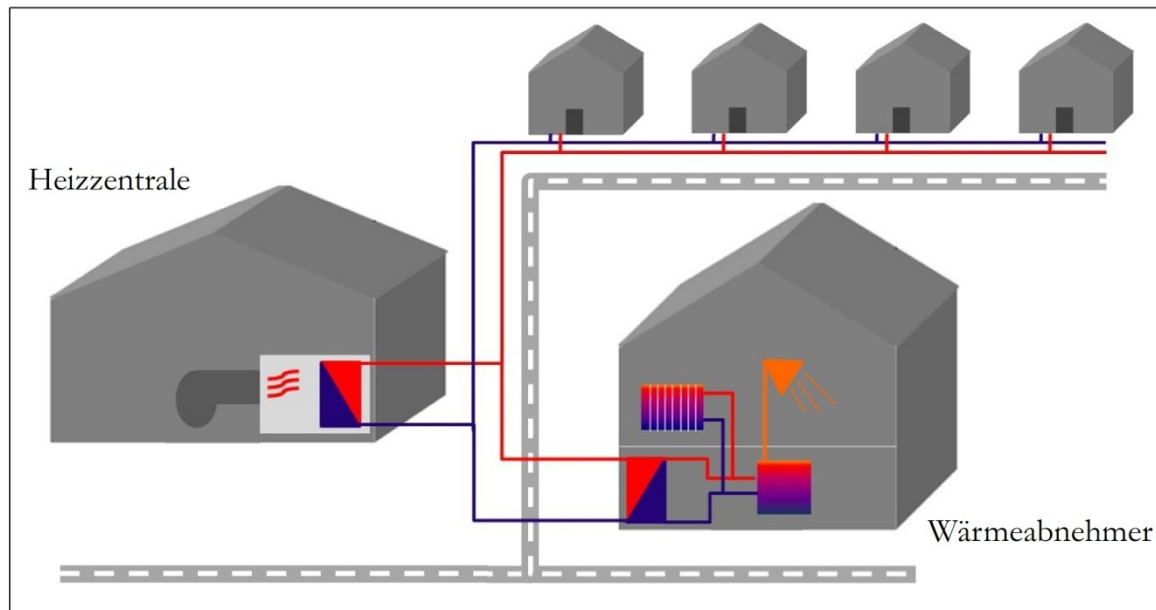
In diesem Kapitel werden die Grundlagen erörtert, welche für das Verständnis der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Arbeiten notwendig sind. Hierzu wird zunächst die Funktionsweise einer leitungsgebundenen Wärmeversorgung erläutert. Darüber hinaus werden die gängigen Herangehensweisen zur Bestimmung von Wärmenetzpotenzialen aufgezeigt, mit speziellem Fokus auf Modellansätzen und der Einbindung Geographischer Informationssysteme (GIS) und Techniken der digitalen Bildanalyse (DBA).

### 2.1 Aufbau und Funktionsweise

Als Wärmenetze wird die technische Infrastruktur zur leitungsgebundenen Verteilung thermischer Energie zwischen einer zentralen Wärmequelle und einer mehr oder minder umfassenden Anzahl an Verbrauchern bezeichnet. Die thermische Energie wird in einer Heizzentrale entweder direkt erzeugt oder sie fällt in Form von Abwärme als Nebenprodukt bei der Stromerzeugung an.

Im Allgemeinen bilden Wärmenetze einen geschlossenen Heizkreis, innerhalb dessen das erwärmte Transportmedium - üblicherweise Wasser oder Wasserdampf - in isolierten Rohrleitungen zu den Verbrauchern transportiert wird. Nach Abgabe der Wärmeenergie fließt der Energieträger dann im abgekühlten Zustand zur Heizzentrale zurück, um erneut erwärmt zu werden. In Deutschland sind die Wärmenetze überwiegend als Zweileitersysteme verlegt, in denen eine Leitung als Vorlauf, die andere als Rücklauf des Energieträgers dient. Die Hauptverteilungsleitungen eines Wärmenetzes werden dabei in der Regel entlang des bestehenden Straßennetzes verlegt. Von diesen Hauptverteilungsleitungen zweigen dann Hausanschlussleitungen ab, die durch eine wasserisolierte Mauerdurchführung in die Untergeschosse der Gebäude geführt werden. Innerhalb des Gebäudes wird die Wärmeleitung über eine Hausübergabestation an das gebäudeinterne Verteilnetz angeschlossen, wodurch sich das Gebäude mit Raumwärme und Warmwasser versorgen lässt (Abbildung 2-1).

Je nach durchschnittlicher Distanz von Produzent zu Verbraucher der thermischen Energie, wird zwischen Fern- und Nahwärmeversorgung differenziert. So grenzt sich Nahwärme von Fernwärme durch eine leitungsgebundene Wärmeversorgung auf kleinräumiger Ebene mit geringer Transportentfernung ab. Als grober Richtwert kann hier eine Distanz von rund einem Kilometer zwischen Produzent und Verbraucher angesetzt werden. Demgegenüber bezeichnet Fernwärme thermische Energie, die nicht in unmittelbarer Umgebung ihrer Erzeugung verbraucht wird, sondern über weit größere Entfernungen zum Abnehmer geleitet wird (Fischedick et al., 2007).



**Abbildung 2-1: Prinzip und Aufbau eines Nahwärmesystems.** Als Wärmenetz wird die technische Infrastruktur zur leitungsgebundenen Verteilung thermischer Energie zwischen einer zentralen Wärmequelle und einer mehr oder minder umfassenden Anzahl an Verbrauchern bezeichnet. Die thermische Energie wird in einer Heizzentrale entweder direkt erzeugt oder sie fällt in Form von Abwärme als Nebenprodukt bei der Stromerzeugung an.

## 2.2 Bestimmung von Wärmenetzpotenzialen

Wie in Kapitel 1 dargelegt, ist der Ausbau von Wärmenetzen ein unverzichtbarer Baustein für die Umsetzung einer nachhaltigen Energieversorgung in Deutschland. Um die daraus resultierenden ökonomischen sowie raum- und regionalplanerischen Entscheidungsprozesse – speziell mit Blick auf die Planung neuer Netze – zu unterstützen, sind raumbezogene Analysen der Siedlungs- und Verkehrswegeinfrastruktur von hoher Bedeutung. Vor diesem Hintergrund ist es Ziel dieser Studie, eine (teil-)automatisierte Methodik zu entwickeln und anzuwenden, die auf Basis bundesweit verfügbarer Datenquellen eine Quantifizierung des Wärmenetzpotenzials ermöglicht.

### 2.2.1 Konzepte und Methoden

Eine detaillierte Bestimmung des Potenzials leitungsgebundener Wärmeversorgung setzt die Berücksichtigung der räumlichen Verteilung baulicher Strukturen voraus (Blesl et al., 2001). Die Bewertung, in welchem Umfang bauliche Strukturen für eine leitungsgebundene Wärmeversorgung geeignet sind, wird dabei in hohem Maße von siedlungstypologischen Voraussetzungen – etwa Art und Lage der Gebäude – geprägt (Eickmeier & Schulz, 2004). Vor diesem Hintergrund ist der kleinräumigen Komponente bei der Bewertung von Arealen hinsicht-

lich ihres Potenzials für leitungsgebundene Wärmeversorgung allgemein ein hoher Stellenwert beizumessen.

Der Zusammenhang zwischen Bau- bzw. Siedlungsstruktur und Wärmeverteilungssystemen wird erstmals von Roth et al. (1977, 1980) beschrieben. Winkens (1985) adaptiert diese Arbeiten und charakterisiert verschiedene Siedlungstypen mit spezifischen Kosten der Wärmeverteilungssysteme. Dazu leitet er auf Basis kartographischer Verfahren verschiedenartige Bebauungstypen ab. Für diese werden anhand detaillierter Vor-Ort-Erhebungen (Haus-zu-Haus) idealtypische Kennwerte hinsichtlich des bestehenden und zukünftigen Wärmebedarfs und der Kosten für die Energieverteilung, differenziert nach unterschiedlichen Energieerzeugungssystemen, ausgewiesen.

Im Rahmen einer Vor- und Hauptstudie zu Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung unter Leitung der AGFW werden u.a. verschiedene Ansätze vorgestellt, um räumlich disaggregierte Aussagen über Perspektiven einer leitungsgebundenen Wärmeversorgung zu treffen (Lutsch & Witterhold, 2005). Blesl et al. (2001) charakterisieren hierzu verschiedene Siedlungstypen, um exemplarische Versorgungsfälle bzw. Gebiete zu beschreiben. Dazu werden Luftbildaufnahmen eines Versorgungsgebietes manuell ausgewertet und mit Hilfe von GIS weiterverarbeitet. Eickmeier & Schulz (2004) zeigen anhand regionaler Statistiken für ausgewählte Referenz-Modellstädte und -gemeinden mit mehr als 20000 Einwohnern die Entwicklungsmöglichkeiten für Wärmenetze in Deutschland. Einzelobjekte können mit derartigen Ansätzen nicht erfasst werden. Vor diesem Hintergrund haben die Arbeiten von Neidhart & Brenner (2003) bzw. Sester et al. (2004) und Neidhart & Sester (2006) zum Ziel, ein Verfahren zu entwickeln, das eine räumlich detaillierte Bestimmung des Wärmebedarfs und dessen räumlicher Verteilung zulässt. Hierfür werden Gebäude auf Basis von flugzeuggestützten Laserscanning-Daten (ALS) und der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) rekonstruiert. Das ermittelte Volumen wird mit einem spezifischen Wärmebedarfskoeffizienten kombiniert, der einer Gebäudetypologie entnommen wird. Die verwendeten Gebäudetypen werden dabei anhand geometrischer Formparameter gebildet. Eine weitere Einteilung der Siedlungsstruktur für die Abschätzung infrastruktureller Parameter wird nicht vorgenommen. Sowohl für die regionale Erhebung des Wärmebedarfs als auch für die Bewertung der lokalen Siedlungsstruktur hinsichtlich leitungsgebundener Wärmeversorgung verwenden Fishedick et al. (2007) und Schillings et al. (2007) Landnutzungsinformationen aus Fernerkundungsdaten in Kombination mit kommerziellen Geodaten zum Gebäudebestand je Gemeinde. Zusätzlich werden regenerative Energiepotenziale (Biomasse, Geothermie und solare Einstrahlung) berücksichtigt. Auf dieser Grundlage werden für Deutschland Gemeinden identifiziert, die für die Etablierung von Nahwärmenetzen auf Basis erneuerbarer Energien besonders geeignet sind. Aufgrund von Unsicherheiten bei der satellitengestützten Identifikation von Industriegebieten und wegen Problemen bei der Zuordnung

von Nichtwohngebäuden zu einzelnen Gemeinden, konnten verlässliche Aussagen jedoch nur auf Kreisebene getroffen werden.

Bestehende Regionalisierungsansätze zur Potenzialbewertung leitungsgebundener Wärmeversorgung erfassen demnach nur Teilbereiche der Thematik, beschränken sich auf ausgewählte Raumausschnitte oder müssen auf einen Detaillierungsgrad, der zumindest gemeindebezogene Aussagen ermöglicht, verzichten, um flächendeckende Ergebnisse liefern zu können.

### **2.2.2 Verfahren zur raumbezogenen Analyse**

Die bundesweite Ausweisung von Potenzialen einer leitungsgebundenen Wärmeversorgung erfordert den Einsatz von Analysemethoden, mit denen sich verschiedenste Datentypen zusammenführen und mit Raumbezug auswerten lassen. Zugleich muss eine automatisierte oder zumindest teilautomatisierte Prozessierung und Analyse der Daten gewährleistet sein, um angesichts der enormen Datenmengen eine rasche und somit kostengünstige Verarbeitung zu realisieren. In diesem Zusammenhang bieten Verfahren der geographischen Informationsverarbeitung – sogenannte Geographische Informationssysteme (GIS) – umfassende und hilfreiche Analysefunktionen. Darüber hinaus sind speziell mit Blick auf die Extraktion von Inhalten aus digitalen Bilddaten Techniken und Algorithmen der digitalen Bildanalyse (DBA) von hohem Nutzen. Im Rahmen dieser Studie werden Ansätze aus beiden Bereichen eingesetzt, weshalb im Folgenden die grundlegenden Konzepte – unter besonderer Berücksichtigung der Funktionsweisen der verwendeten Softwarepakete – dargelegt werden.

#### *Geographische Informationssysteme (GIS)*

GIS umfassen in der Regel Funktionalitäten zur Erfassung, Speicherung, Analyse, Manipulation sowie Darstellung raumbezogener Daten und lassen sich allgemein als Werkzeuge für die Analyse, Dokumentation und visuelle Aufbereitung räumhafter Phänomene bezeichnen (Schuurman, 2004). Lang & Blaschke (2007) weisen darauf hin, dass sich GIS von einem reinen computerbasierten Unterstützungswerkzeug zur Handhabung großer Datenmengen zu einem wissenschaftlichen Apparat entwickelt haben, der als „Geographical Information Systems and Science“ bezeichnet werden kann. In diesem Zusammenhang bezeichnen GIS einen speziellen Softwaretypus mit entsprechender Hardwarekonstellation, an den eine vielschichtige Methodik angeschlossen ist.

Das wesentliche methodische Konzept eines GIS liegt in der Integration und Bezugsetzung von Erscheinungen der Erdoberfläche über einen räumlichen Schlüssel. Auf dieser Basis können Objekte verschiedenster Kategorien miteinander kombiniert werden, um im Raum stattfindende Prozesse zu charakterisieren. Analog zum Konzept des Primärschlüssels einer Datenbank wird die an Objekte oder Phänomene gebundene Sachinformation über einen

räumlichen Schlüssel in eine eindeutige Beziehung gesetzt. Daten die eine derartige Verknüpfung von Sach- und Geoinformation aufweisen, werden als Geodaten bezeichnet. Hinsichtlich des Datenmodells wird grundsätzlich zwischen Vektor- und Rasterdaten unterschieden. Vektordaten werden durch eine diskrete Trennung von Sach- bzw. Attributdaten und Geometrieinformation charakterisiert. Die im Vektormodell dargestellten Datenschichten (Layer) beinhalten eine Tabelle mit den zugehörigen Informationen über die Attribute. Jedem räumlichen Objekt bzw. jeder Entität wird eine Zeile in der Attributtabelle zugeordnet. Die Attribute werden in den Spalten der Tabelle organisiert und gespeichert. Rasterdaten hingegen eignen sich für die Darstellung flächendeckender, räumlich kontinuierlicher Phänomene. Deren Ausprägung wird dabei in einer Rasterzelle gespeichert.

Räumliche Analysemethoden werden für die Untersuchung von Beziehungen zwischen räumlichen Einheiten innerhalb einer oder mehrerer Datenschichten angewendet. Wird nur eine Datenschicht betrachtet, so spricht man von einer „horizontalen“ Analyse, da die lateralen Nachbarschaftsbeziehungen im Vordergrund stehen. Von einer „vertikalen“ Analyse spricht man, wenn mehrere Datenschichten integriert werden – d.h. die Informationsebenen werden übereinander gelegt, kombiniert und verschnitten. GIS-gestützte Auswertemethoden haben dabei grundsätzlich eine Neugenerierung von Informationen auf Basis der Integration und Manipulation bestehender Datenschichten zum Ziel. Dabei werden vielseitige Analysefunktionen – etwa zur Unterstützung von Potenzialanalysen – bereitgestellt. Allgemein werden GIS verstärkt als strategisches Planungsinstrument für raumbezogene Fragestellungen genutzt, da Zusammenhänge, Hintergründe und Trends analysiert und sichtbar gemacht werden können (Follmann, 1999).

Im Rahmen dieser Studie wurde das etablierte Desktop-GIS „ArcGIS“ von ESRI, Version 9.3.1, eingesetzt. Die Charakterisierung der Objekte bzw. Entitäten einer Informationsebene erfolgt durch Attribute (Spalten), deren Wertausprägungen in den Tabellenzeilen gespeichert werden. Die Software enthält mehrere Programmierumgebungen. Für die vorliegende Arbeit wurden Skripte entwickelt, die entweder auf der implementierten Programmiersprache Visual Basic for Applications (VBA) oder aber auf Python basieren, um die Werte in den Attributspalten anhand definierter Bedingungen und Regeln zu analysieren und ggf. zu modifizieren.

#### *Digitale Bildanalyse (DBA)*

Ziel der computergestützten DBA ist es, mittels spezieller Algorithmen spezifische Informationen aus digitalen Bilddaten zu extrahieren. Techniken der DBA werden insbesondere im Bereich der Fernerkundung, aber auch der Medizin- und Verfahrens- bzw. Produktionstechnik umfassend eingesetzt und weiterentwickelt. Obwohl die thematische Genauigkeit bzw. semantische Komplexität einer solchen Auswertung in der Regel hinter der Güte einer visuellen Interpretation zurückbleibt, weisen entsprechende Ansätze dennoch entscheidende Vor-

teile auf. So erfolgt die Auswertung zum einen auf der Basis objektiver Kriterien oder Regelwerke. Darüber hinaus können über eine (semi-)automatisierte Analyse umfassende Datenmengen in kürzester Zeit – und damit kostensparend – ausgewertet werden. Zudem sind rechnergestützte Verfahren dem menschlichen Sehvermögen in Bezug auf die quantitative Analyse von Grauwerten, Farben oder Flächengrößen deutlich überlegen.

Die Verfahren der DBA bedienen sich speziellen Algorithmen zur mathematischen Mustererkennung, die entweder unüberwacht oder überwacht ablaufen. Im Rahmen unüberwachter Ansätze wird die Anzahl gewünschter Klassen vorgegeben, um im Anschluss daran alle Bildelemente des mitunter mehrdimensionalen Merkmalsraums nach Ähnlichkeitskriterien optimal in eine vordefinierte Anzahl an Clustern zu unterteilen. Abschließend muss den daraus resultierenden, rein statistisch generierten Klassen eine inhaltliche Bedeutung zugewiesen werden. Im Gegensatz dazu werden im Zuge überwachter Klassifikationsverfahren im Vorfeld der eigentlichen Auswertung für jede erwünschte Objektart repräsentative Beispielareale in den Bilddaten bestimmt. Auf der Basis dieser sogenannten Trainingsflächen wird anschließend die charakteristische Ausprägung beliebig definierbarer Merkmale – z.B. Farbe, Form und Helligkeit – für jede Objektart bestimmt. Im Rahmen der Klassifikation wird nun unter Verwendung spezieller Algorithmen (Ähnlichkeits- und Distanzmaße) für jede Auflösungszelle bzw. für jedes Bildobjekt berechnet, welcher der zuvor definierten Trainingsklassen dieses Pixel bzw. dieses Bildobjekt am ähnlichsten ist. Zu den etablierten Methoden der überwachten Klassifikation zählen der Maximum-Likelihood Klassifikator und das Nearest-Neighbour Verfahren. Überwachte Ansätze bieten den Vorteil, dass Art und Anzahl der Objektklassen frei gewählt und damit spezifisch auf die jeweilige Zielsetzung angepasst werden können. Mitunter wird der überwachten Klassifizierung auch eine Cluster-Analyse vorgeschaltet. In einem solchen Fall spricht man von einer hybriden Klassifizierung.

Im Zuge der vorliegenden Studie wurden über die Software „eCognition“ (Version 8.0) Techniken der objektorientierten Bildanalyse eingesetzt, um bestimmte Inhalte – in diesem Fall Häuser – aus digitalen Topographischen Karten zu extrahieren. Das in der Software „eCognition“ umgesetzte Konzept einer segmentbasierten, multiskaligen Bildanalyse orientiert sich an dem kognitiven, menschlichen Interpretationsverhalten (Baatz & Schäpe, 2000). Im Gegensatz zu pixelbasierten Techniken, bei denen die einzelnen Bildelemente isoliert betrachtet werden, zielen objektorientierte Ansätze auf die Analyse definierter Raumeinheiten (Objekte, Segmente) und ihrer Zusammenhänge ab. Dabei kann die Bildauswertung grundsätzlich in drei Arbeitsschritte gegliedert werden: Zu Beginn werden die einzelnen Bildelemente – die sogenannten Pixel – entsprechend ihrer Ähnlichkeit über eine Segmentierung zu Objekten gruppiert. Anhand der Eigenschaften dieser neuen Bezugs- bzw. Raumeinheiten wird anschließend ein Regelwerk definiert, das für jede zu extrahierende bzw. klassifizierende Objektart die typische Ausprägung anhand bestimmter Objektattribute festlegt. Auf

Grundlage dieses Regelwerks und der darin definierten Eigenschaften erfolgt abschließend die Bildklassifikation.

### 3 Bundesweite Modellierung des Wärmenetzpotenzials

Im Rahmen des Vorhabens wird über eine Kombination verschiedener Datengrundlagen und Auswertetechniken eine bundesweite, gemeindebezogene Potenzialanalyse hinsichtlich des Aufbaus von Wärmenetzen durchgeführt. Grundlage der Arbeiten sind Methoden und Techniken, die das DLR im Rahmen von Fallstudien mit räumlich höchstauflösenden Datenquellen - u.a. am Beispiel der Stadt München - entwickelt hat (Geiß et al., 2010; Geiß et al., 2011). Die dabei eingesetzten Verfahren werden im Rahmen dieser bundesweiten Studie adaptiert und flächendeckend angewandt. Zu diesem Zweck werden verschiedene Informationsebenen aus amtlicher Vermessung und räumlicher Statistik unter Nutzung spezieller Auswertetechniken aus DBA und GIS zusammengeführt, analysiert und bewertet. Die Resultate der Modellierung werden auf der administrativen Ebene von Gemeinden ausgegeben.

#### 3.1 Räumliches Potenzialmodell

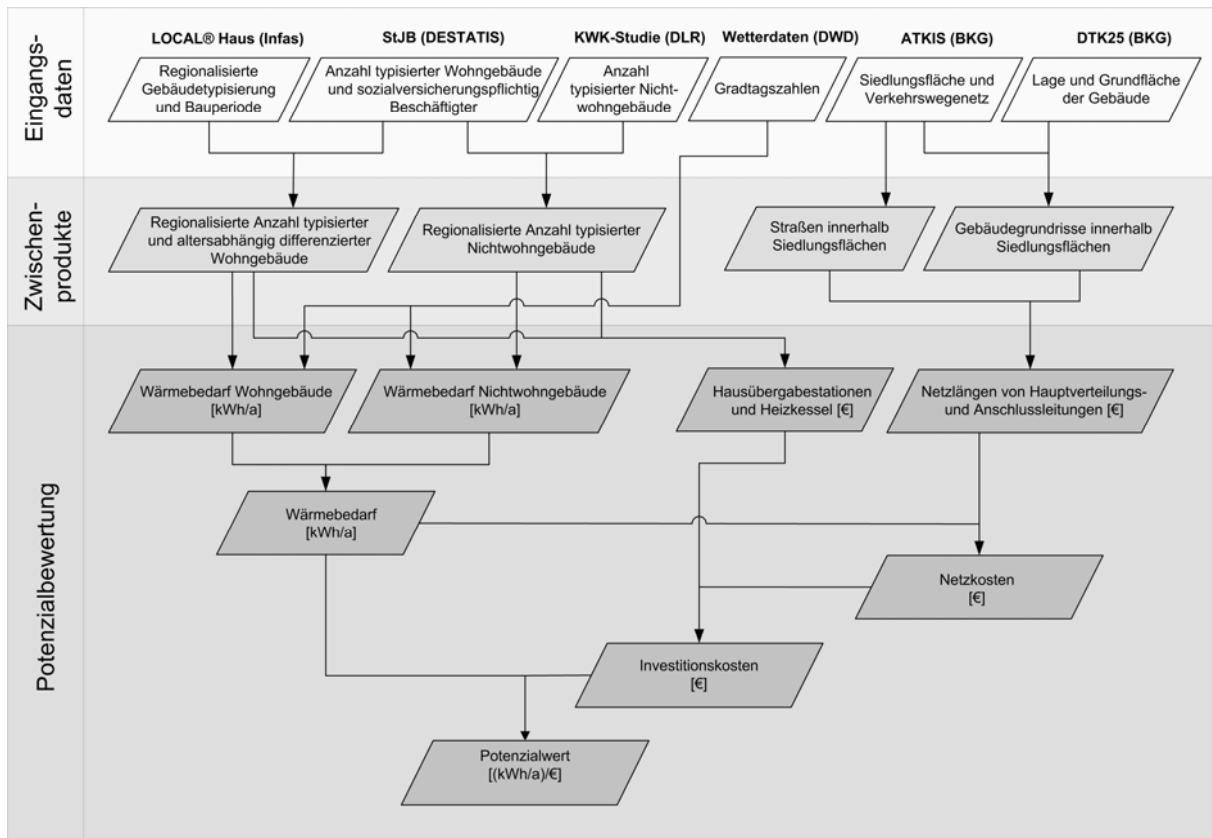
Die Ermittlung von Nahwärmepotenzialen basiert auf vielfältigen physischen Parametern zur Charakterisierung baulicher Strukturen. Aufgrund hoher Investitionsvolumina hängt die Möglichkeit der Nutzung eines leitungsgebundenen Wärmeversorgungssystems dabei primär von der Höhe des lokalen Wärmeabsatzes ab. Zentraler Parameter ist in diesem Zusammenhang der jährliche Wärmebedarf der Gebäude. Dieser leitet sich aus der quantifizierten Wärmebezugsfläche der Gebäude und einem spezifischen Wärmebedarfswert ab. Der spezifische Wärmebedarfswert stellt wiederum einen idealtypischen Kennwert dar, der vom Gebäudetyp, der Nutzung des Gebäudes, dem Baualter sowie den klimatischen Rahmenbedingungen abhängt (Fischedick et al., 2007; Kleeman et al., 2004; Sester et al., 2004).

Die Vermutung, dass höhere Wärmedichten stets vorteilhaft sind, berücksichtigt nicht die zur Erschließung dieses Potenzials notwendigen Verteilungskosten. So bedingen zum Beispiel Siedlungsstrukturen mit höheren Wärmedichten in der Regel auch höhere Kosten hinsichtlich der Leitungsverlegung (Eickmeier & Schulz, 2004). Für die Potenzialmodellierung wird deshalb der wirtschaftliche Aufwand für die Erschließung des vorhandenen Wärmebedarfs berechnet. Dazu werden zunächst die infrastrukturellen Kosten einer Nahwärmebereitstellung aufsummiert: dies umfasst Kosten für das Nahwärmenetz, für die Anschlussleitungen zu den einzelnen Gebäuden sowie für die Hausübergabestationen. Um nur die Mehrkosten gegenüber einer konventionellen Wärmebereitstellung zu berücksichtigen, werden die Kosten eines Heizkesseltausches für Öl bzw. Gas von den Investitionskosten für Nahwärme subtrahiert. Da eine Analyse primär in bereits wärmeversorgten Gebäudebeständen durchgeführt wird, ist der Restwert der bestehenden Kessel zum Zeitpunkt des Anschlusses an das Wärmenetz zu berücksichtigen. Für den Restwert wird für die vorgenommene Regionalisierung



ein Schätzwert von 0,5 angenommen (siehe hierzu Kapitel 3.4.4). Neben diesem Ansatz wird zusätzlich eine Potenzialbewertung ohne Berücksichtigung der Kosten einer konventionellen Wärmebereitstellung gegeben (siehe hierzu Kapitel 3.5.1).

Auf Grundlage dieser Parameter lässt sich ein Kennwert ermitteln, mit dessen Hilfe eine Aussage über die physisch-strukturellen Standortbedingungen für Nahwärme getroffen werden kann. Der Kennwert setzt sich aus der Division des jährlichen Wärmebedarfs durch die benötigten infrastrukturellen Investitionskosten zusammen und repräsentiert die durch das Versorgungssystem jährlich erschließbare Wärmemenge pro investierter Geldeinheit [€] (Abbildung 3-1). Die Potenzialwerte werden auf Gemeindeebene in (kWh/Jahr)/€ ausgewiesen. Je höher dieser Wert ist, desto besser ist die jeweilige Siedlungsfläche für eine Nahwärmeversorgung geeignet.



**Abbildung 3-1: Schematischer Ablauf der bundesweiten Modellierung des Wärmenetzpotenzials.** Auf Basis von raumbezogenen Informationen, die den örtlichen Gebäudebestand und dessen wärmerelevante Charakteristika abbilden, wird der gemeindebezogene Wärmebedarf gebildet. Dieser wird den infrastrukturellen Investitionskosten gegenübergestellt, deren Bestimmung anhand aufbereiteter, amtlicher Geoinformationen vorgenommen wird.

## 3.2 Datengrundlage

Eine detaillierte Charakterisierung von Siedlungsstrukturen hinsichtlich der Erhebung von Merkmalen zum Wärmebedarf und zur Wärmeinfrastruktur setzt hochauflösende Daten-

grundlagen voraus. Aktuelle und flächendeckende Analysen bei gleichzeitig hoher thematischer Detaillierung sind mit konventionellen Informationserhebungsverfahren wie Kartierungen, manuellen Luftbildauswertungen und statistischen Erhebungen kaum mehr realisierbar. Auch ist die Auswertung von analogen Kartenwerken mit einem enormen Aufwand verbunden. Vor diesem Hintergrund beschränken sich bestehende Regionalisierungsansätze auf ausgewählte Raumausschnitte oder müssen auf einen hohen räumlichen Detaillierungsgrad verzichten, um flächendeckende Ergebnisse liefern zu können (siehe Kapitel 2.2.1).

GIS und DBA bieten in diesem Kontext die Möglichkeit, aus räumlich sehr detaillierten Geodaten raumbezogene Informationen automatisiert zu extrahieren und zu analysieren. Es ist zu berücksichtigen, dass diese Auswertetechniken ihrerseits spezifische Eigenschaften der zugrunde liegenden Daten voraus setzen. Zudem erfordert eine bundesweite Analyse der Siedlungsstruktur im vorgegebenen Zeitraum dieser Studie die umfassende Nutzung etablierter Geodaten, um einerseits eine für das Bundesgebiet gleichbleibende Charakteristik und Güte zu gewährleisten und andererseits den Aufwand zur Aufbereitung und Verarbeitung der Geoinformationen (z.B. einlesen, georeferenzieren, fusionieren, harmonisieren) möglichst gering zu halten (Meinel et al. 2008). Welche raumbezogenen Informationen zur Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale benötigt werden und welche Geodaten die für diese Aufgabe erforderlichen Anforderungen erfüllen, ist nachfolgend aufgeführt:

#### *Gebäudebestand*

Die dargestellten Anforderungen an die Datengrundlage werden nur von wenigen Geoinformationsprodukten erfüllt. Für eine hoch detaillierte Charakterisierung der Siedlungsstruktur hinsichtlich ihrer Merkmale zu Wärmebedarf und -infrastruktur ist eine Repräsentation des Gebäudebestandes mit zugehöriger Gebäudegrundfläche und Gebäudehöhe ideal. Ein von amtlichen Vermessungsbehörden zentral vorgehaltener Datensatz, der diese Anforderungen erfüllt, ist gegenwärtig jedoch nicht verfügbar.

Die ALK bzw. das auf dieser Basis weiterentwickelte Amtliche Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS) führen den digitalisierten Bestand der Gebäudegrundflächen. Die Gebäude werden auf Grundlage von terrestrischen Messungen erhoben und weisen eine dementsprechend hohe geometrische Genauigkeit auf. Trotz ihrer potentiell guten Eignung konnten die Daten der ALK bzw. des ALKIS nicht im Rahmen der Studie eingesetzt werden. Dies liegt darin begründet, dass die Datenbestände derzeit noch nicht einheitlich und homogenisiert für das gesamte Bundesgebiet vorliegen, die Nutzung eines bundesweiten Datensatzes mit hohen Lizenzkosten verbunden ist und Informationen zum Datenbestand sowie Erhebungsstatus aktuell dezentral und aufwändig über die Landesvermessungsämter bezogen werden müssen.

In der Realisierungsstufe 2 des ATKIS Basis-DLM ist keine flächenhafte Darstellung der Gebäudegrundrisse enthalten. In Planung ist eine weitere Realisierungsstufe (DLM/3), die Gebäudegrundrisse enthalten soll. Allerdings ist fraglich, ob diese deutschlandweit standardisiert erhoben und bereitgestellt werden, da einzelne Landesvermessungsämter keine Gebäudedarstellung anstreben. Dieses Vorgehen ist sowohl technischen Problemen geschuldet (Lagedifferenzen zwischen Gebäude- und Blockgeometrie) als auch durch die Überlegung beeinflusst, die Alleinstellungsmerkmale anderer Informationsprodukte (z.B. ALK oder DTK5) nicht aufzuheben (Meinel et al., 2008).

Alternativ stellt die DTK25-V eine interessante Datenquelle dar, auf deren Grundlage Gebäudegrundflächen automatisiert extrahiert werden können. Anders als in den stark generalisierten Darstellungen kleinmaßstäbiger Karten (DTK50, DTK100, DTK200) sind Gebäude in der DTK10 vollständig und in der DTK25-V mit einem vergleichsweise geringen Generalisierungsgrad (Einzelgebäude ab  $\geq 15$  m Gebäudelänge) repräsentiert. Die Nutzung der DTK25-V bietet für das vorgestellte Verfahren Vorteile hinsichtlich der bundesweit homogenisierten Verfügbarkeit, der zentralen Vorhaltung durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) sowie der Volltondarstellung der Gebäudegrundrisse, die, im Gegensatz zur Randliniendarstellung der DTK10, eine automatische Extraktion mit Bildanalyseverfahren erleichtert.

Die Darstellung der Gebäudegrundrisse in der DTK25-V beinhaltet verschiedene Verfahrenscharakteristika und Generalisierungsregeln. Die Mindestgröße der Gebäudedarstellung beträgt 0,4 mm Breite (10 m) und 0,6 mm Länge (15 m). Gebäude, die diesen Grenzwert unterschreiten, werden vergrößert dargestellt. Grundrisse von Kirchen, Klöstern, Kapellen und Türmen werden nicht dargestellt, sondern als Signatur wiedergegeben. Zusätzlich unterliegen komplexe Gebäudegrundrisslinien einer moderaten Vereinfachung. Nebengebäude werden in die zugehörigen Hauptgebäude integriert, insofern eine Mindestgröße unterschritten wird. Eine geringfügige Lageverschiebung der Gebäude kann sich aus der verbreiteten Darstellung des Straßennetzes ergeben, wobei die Lageverschiebung in der Regel weniger als 4 m beträgt (Meinel et al., 2008). Gegenwärtig sind in der deutschlandweit verfügbaren Version der DTK25-V („alte Kartengraphik“) Gebäude nicht separiert dargestellt, sondern mit anderen Kartenelementen wie Straßen, Vegetations- und Schriftsignaturen kombiniert. Vom BKG wird derzeit eine neue Kartengraphik erarbeitet, in der Gebäudeflächen in einer einzelnen thematischen Ebene repräsentiert werden. Diese Verschmelzung von verschiedenen Informationsebenen in einer binären Informationsebene bedingt die Entwicklung einer Methodik, um Gebäudegrundrisse von für diese Studie irrelevanten Informationen zu trennen.

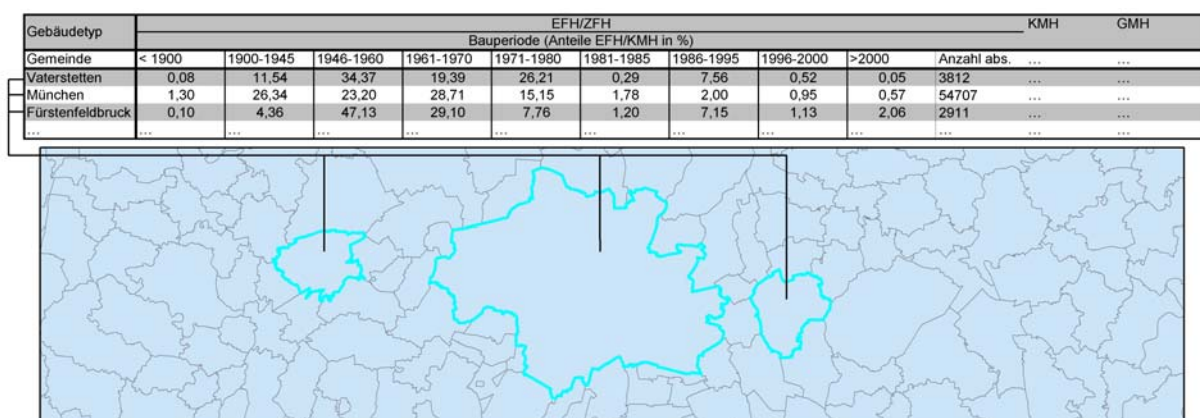
Neben den Gebäudeinformationen der DTK25 werden für die deutschlandweite Analyse Gebäudeinformationen aus dem Datensatz „LOCAL® Haus“ des Geodatenanbieters Infas integriert. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass alleine auf Basis der Gebäudegrundrissflächen

keine valide Aussage hinsichtlich des Volumens eines Gebäudes und damit der Wärmebezugsfläche möglich ist. Der verwendete Infas-Datensatz enthält Angaben über die absolute Anzahl von Ein-/Zweifamilienhäusern sowie kleinen und großen Mehrfamilienhäusern. Die Daten werden anhand von örtlichen Begehungen adressbezogen erhoben und wurden für das Projekt bundesweit, bezogen auf die Gemeindeebene, angeschafft.

Ein Abgleich des Wohngebäudebestandes laut Infas mit Zahlen des statistischen Bundesamtes (StJb, 2010) auf Bundesebene zeigt, dass hinsichtlich der absoluten Anzahl nennenswerte Abweichungen bestehen. Vor diesem Hintergrund werden die Angaben des Statistischen Jahrbuchs (StJb) zur absoluten Anzahl an Wohngebäuden in die Analysen integriert (vgl. Kapitel 3.3.1). Auch hinsichtlich der Angaben über Nichtwohngebäude bestehen Unsicherheiten bezüglich der absoluten Anzahl und der räumlichen Verteilung. Daher werden zudem Angaben des StJb über sozialversicherungspflichtige Beschäftigte am Arbeitsort integriert (vgl. Kapitel 3.3.2).

#### Gebäudealter

Der spezifische Raumwärmebedarf von Gebäuden korreliert stark mit dem Baualter. Ältere Gebäude haben in der Regel einen höheren flächenspezifischen Bedarf als neuere Gebäude (Fischedick et al., 2007). Dieser Zusammenhang ist primär auf fehlende Wärmeschutzverordnungen zurückzuführen, die erstmals im Jahr 1978 in Deutschland eingeführt wurden. Der Materialmangel in den Nachkriegsjahren spiegelt sich in einem überproportional hohen Wärmebedarf wider und wurde durch eine verstärkte, allgemeine Nachfrage auf dem Bau-sektor zusätzlich verschärft. Induziert durch die Ölpreiskrisen der 1970er Jahre, werden seit diesem Zeitraum besser isolierte Gebäude mit folglich niedrigerem Wärmebedarf gebaut. Für die folgenden Perioden, die durch weitere Wärmeschutzverordnungen gekennzeichnet sind, ist eine stetige Verminderung des flächenspezifischen Wärmebedarfs anzunehmen.



**Abbildung 3-2: Struktur und Inhalte der Geodaten von Infas.** Der Ausschnitt zeigt den altersabhängig differenzierten, typisierten Wohngebäudebestand in der Region München auf Gemeindeebene.

Für eine Berücksichtigung des Gebäudealters wird der bereits erwähnte Datensatz LOCAL® Haus von Infas integriert. Das Gebäudealter wird auf Basis von örtlichen Begehungen erhoben und liegt für Deutschland auf Gemeindeebene für unterschiedliche Gebäudetypen - differenziert nach zehn Baualtersklassen vor. Dieser umfasst die Bauperioden vor 1900, 1900-1945, 1946-1960, 1961-1970, 1971-1980, 1981-1985, 1986-1995, 1996-2000, 2001-2005 und 2006-2010 (Abbildung 3-2).

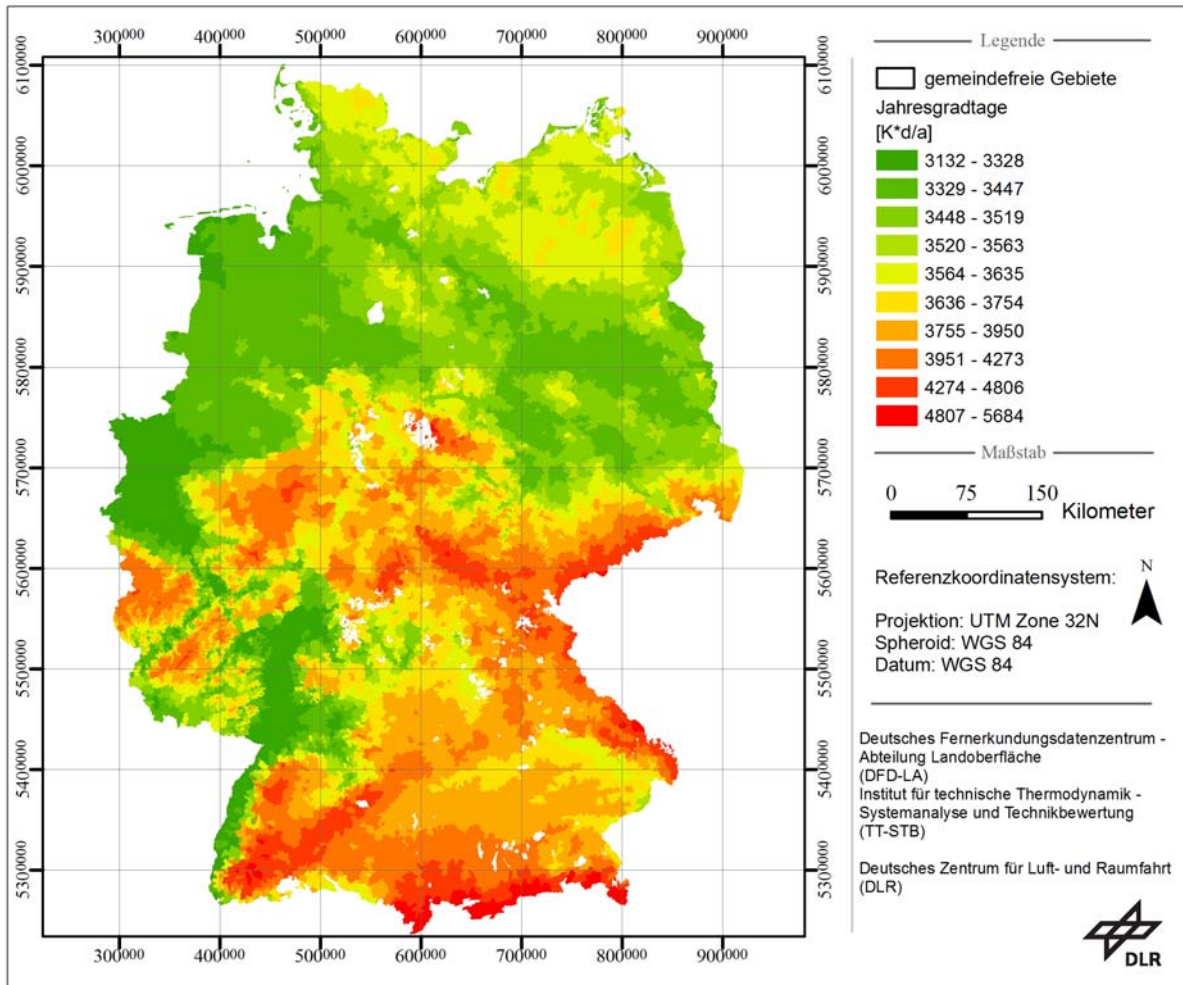
#### *Gradtagzahlen*

Für eine Berücksichtigung kleinräumiger klimatischer Rahmenbedingung werden Informationen über Gradtagzahlen in die Analysen integriert. Gradtagzahlen und Gradtage stellen den Zusammenhang zwischen der Außenlufttemperatur und der gewünschten Rauminnentemperatur her. Ist die Differenz zwischen der Rauminnentemperatur und der Außentemperatur groß, werden hohe Werte für die Gradtagzahl erreicht. Analog ist die Gradtagzahl niedrig, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenraum gering ist. Für die vorliegenden Analysen werden mittlere jährliche Gradtagzahlen aus dem Zeitraum 1991 bis 2000 verwendet, die nach der VDI-Richtlinie 2067 vom Deutschen Wetterdienst (DWD) berechnet werden.

In dem Berechnungsverfahren wird die Gradtagzahl ermittelt, wenn die Außentemperatur mindestens 5° C unter der angenommenen Rauminnentemperatur liegt. Nach der VDI-Richtlinie 2067 wird hierfür ein Bezugsniveau von 20° C für die Rauminnentemperatur definiert. Die Größe der Gradtagzahl ergibt sich aus der Differenz der angenommenen Heizgradtemperatur (Rauminnentemperatur) und dem jeweiligen Mittelwert der Außentemperatur über alle Tage eines Zeitraumes (Abbildung 3-3).

#### *Straßennetz*

Neben der Objektgruppe „Siedlung“ stehen im Objektbereich „Straßenverkehr und Rollfelder“ (3000) des ATKIS Basis-DLM in der Objektgruppe „Straßenverkehr“ (3100) Straßenvektoren zur Verfügung. Wie bereits zu Beginn dargestellt, werden Wärmeleitungen in der Regel entlang bestehender Straßen verlegt. Somit kann das Straßennetz als Grundlage für die Abschätzung der leitungsinfrastrukturellen Kosten herangezogen werden.



**Abbildung 3-3: Mittlere Gradtagzahl je Gemeinde.** Die Gradtagzahl ergibt sich aus der Differenz der angenommenen Heizgradtemperatur (Rauminnentemperatur) und dem jeweiligen Mittelwert der Außentemperatur über alle Tage des betrachteten Zeitraumes. Gut zu erkennen sind die vergleichsweise hohen Werte in den Mittelgebirgsregionen und dem alpinen Süden.

### 3.3 Regionalisierung des Wärmebedarfs

Die bundesweite Regionalisierung des Wärmebedarfs erfolgt nach einem Top-Down-Prinzip. Dabei wird der Wärmebedarf für Wohngebäude und Nichtwohngebäude (NWG) separat regionalisiert, da die räumliche Verteilung auf unterschiedlichen methodischen Ansätzen und Datengrundlagen basiert. Bei den Regionalisierungsansätzen wurde berücksichtigt, dass der für das gesamte Bundesgebiet kumulierte Wärmebedarf für Wohngebäude mit den Vorgaben der (temperaturbereinigten) deutschen Energiebilanz für den Bedarf an Raumwärme (ca. 510 TWh/a, Nutzwärme) und Warmwasser (ca. 70 TWh/a, Nutzwärme) übereinstimmt. Der kumulierte Wärmebedarf für Nichtwohngebäude liegt bei ca. 220 TWh/a (Raumwärme und

Warmwasser, Nutzwärme). Der Bedarf an Prozesswärme für Industrie und Gewerbe<sup>1</sup> wird in dieser Studie nicht berücksichtigt, da dieser nicht anhand einer physische-strukturellen Analyse von Siedlungsflächen in ausreichender Genauigkeit abgeleitet werden kann.

### 3.3.1 Wohngebäude

Der Wärmebedarf der Wohngebäude ergibt sich aus der Summe von Raumwärme und Warmwasser (Nutzwärme) auf dem Niveau der Endenergie und steht in direkter Abhängigkeit zum Gebäudetyp. Die vorgenommene Typisierung des Gebäudebestandes bezieht sich in diesem Zusammenhang primär auf die Größe eines Gebäudes in Kombination mit der nutzungsbezogenen Unterscheidung zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden. Neben dem Typus spielt vor allem die Gebäudeform und -gliederung eine wichtige Rolle. Grundsätzlich ist anzunehmen, dass die Wärmeverluste eines Gebäudes umso geringer sind, je kompakter ein Gebäude gebaut ist bzw. je kleiner das Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen ist (Kleeman et al., 2004). Dieser Zusammenhang impliziert, dass eine Vergrößerung der Außenflächen im Verhältnis zum beheizten Volumen die Wärmeverluste eines Gebäudes steigert. Stark untergliederte Gebäude haben somit einen höheren Wärmebedarf als kompakte Bauwerke. Zudem ist ein größeres Gebäude energetisch günstiger als ein kleineres Gebäude gleicher Form (Marquardt, 2004). Eine valide, geometriebezogene Differenzierung wird allerdings erst durch die Integration von Höheninformationen zu den Gebäudeobjekten möglich (vgl. Kapitel 4), da sich bestimmte Gebäudetypen allein durch den Grundriss, wie er generalisiert aus der DTK25-V-V abgeleitet werden kann, kaum voneinander unterscheiden lassen. Dies gilt etwa für die Differenzierung von Punkthochhäusern und größeren, freistehenden Ein-, Zwei- oder Mehrfamilienhäusern.

Vor diesem Hintergrund werden für die bundesweite Regionalisierung des Wärmebedarfs für Wohngebäude die Gebäudebestandinformationen des Infas-Datensatzes mit amtlichen Statistiken des Wohngebäudebestandes (StJb, 2010) kombiniert. Dieses Vorgehen wird durch eine Abweichung der absoluten Gebäudeanzahl des Infas-Datensatzes im Vergleich zu amtlichen statistischen Angaben bedingt, deren Verlässlichkeit als höher einzustufen ist. Auf Basis der relativen räumlichen Verteilung und der zusätzlichen altersabhängigen Differenzierung des Gebäudebestandes der Infas-Daten werden die in Tabelle 3-1 ausgewiesenen Kennwerte der Wohngebäude des statistischen Jahrbuchs (2010) räumlich verteilt. Das Statistische Jahrbuch enthält Angaben zum Wohnungsbestand für alle Bundesländer, unterteilt nach Einfamilienhäusern (EFH), Zweifamilienhäusern (ZFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH). Auf Basis von Erkenntnissen der Saarland-Studie (DLR, 1997) werden die Angaben über

<sup>1</sup> Der gesamte Prozesswärmebedarf Deutschlands liegt bei etwa 550 TWh/a. Der größte Teil des Prozesswärmebedarfs fällt bei sehr hohen Temperaturbereichen an, die mit Wärmenetzen nicht bedient werden können. Der für Nah- und Fernwärmeversorgungen zugängliche Teil des Prozesswärmebedarfs liegt bei etwa 100 TWh/a.

den Gebäudetyp „Mehrfamilienhaus“ zusätzlich in kleine (KMH) und große Mehrfamilienhäuser (GMH) unterteilt. Die verwendeten relativen Anteile der KMH und GMH, separiert nach neuen und alten Bundesländern, sind ebenfalls in Tabelle 3-1 aufgeführt.

**Tabelle 3-1: Wohngebäudebestand der BRD 2008 (StJb, 2010) und Aufteilung der Mehrfamilienhäuser (MFH) in kleine (KMH) und große (GMH) (DLR, 1997).**

| Bundesland             | Wohngebäudebestand in Deutschland 2008 (StJb 2010) |            |         |            |         |            | Aufteilung der MFH auf Basis DLR (1997) |                      |         |                      |
|------------------------|--|------------|---------|------------|---------|------------|---|----------------------|---------|----------------------|
|                        | EFH  |            | ZFH     |            | MFH     |            | KMH                                     |                      | GMH     |                      |
|                        | Anzahl   | Anteil [%] | Anzahl  | Anteil [%] | Anzahl  | Anteil [%] | Anzahl                                  | Anteil [%]<br>an MFH | Anzahl  | Anteil [%]<br>an MFH |
| Baden-Württemberg      | 1344462  | 11,89      | 561484  | 15,69      | 403083  | 13,15      | 282158                                  | 70                   | 120925  | 30                   |
| Bayern                 | 1918349  | 16,97      | 603967  | 16,88      | 379594  | 12,38      | 265716                                  | 70                   | 113878  | 30                   |
| Berlin                 | 149500   | 1,32       | 21725   | 0,61       | 142485  | 4,65       | 76942                                   | 54                   | 65543   | 46                   |
| Brandenburg            | 442461   | 3,91       | 81871   | 2,29       | 88510   | 2,89       | 47795                                   | 54                   | 40715   | 46                   |
| Bremen                 | 79423  | 0,70       | 20710   | 0,58       | 33710   | 1,10       | 23597                                   | 70                   | 10113   | 30                   |
| Hamburg                | 132779   | 1,17       | 26590   | 0,74       | 77732   | 2,54       | 54412                                   | 70                   | 23320   | 30                   |
| Hessen                 | 776289   | 6,87       | 326725  | 9,13       | 214568  | 7,00       | 150198                                  | 70                   | 64370   | 30                   |
| Mecklenburg-Vorpommern | 254751   | 2,25       | 46065   | 1,29       | 68507   | 2,23       | 36994                                   | 54                   | 31513   | 46                   |
| Niedersachsen          | 1451955  | 12,84      | 376525  | 10,52      | 243357  | 7,94       | 170350                                  | 70                   | 73007   | 30                   |
| Nordrhein-Westfalen    | 2129075  | 18,83      | 744178  | 20,80      | 780941  | 25,47      | 546659                                  | 70                   | 234282  | 30                   |
| Rheinland-Pfalz        | 774170   | 6,85       | 229727  | 6,42       | 118275  | 3,86       | 82793                                   | 70                   | 35483   | 30                   |
| Saarland               | 187612   | 1,66       | 82100   | 2,29       | 28856   | 0,94       | 20199                                   | 70                   | 8657    | 30                   |
| Sachsen                | 415703   | 3,68       | 158877  | 4,44       | 209920  | 6,85       | 113357                                  | 54                   | 96563   | 46                   |
| Sachsen-Anhalt         | 376132   | 3,33       | 87953   | 2,46       | 102676  | 3,35       | 55445                                   | 54                   | 47231   | 46                   |
| Schleswig-Holstein     | 559097   | 4,94       | 94833   | 2,65       | 86194   | 2,81       | 60336                                   | 70                   | 25858   | 30                   |
| Thüringen              | 314574   | 2,78       | 114671  | 3,20       | 87444   | 2,85       | 47220                                   | 54                   | 40224   | 46                   |
| Σ                      | 11306332   | 100        | 3578001 | 100        | 3065852 | 100        | 2034170                                 |                      | 1031682 |                      |

Wie bereits erörtert, wird die absolute Anzahl der Wohngebäude in den einzelnen Gemeinden auf Basis der Gesamtgebäudeanzahl der Bundesländer gebildet. Anhand der prozentualen Verteilung des Wohngebäudebestandes des Infas-Datensatzes wird diese räumlich disaggregiert.

Die Berechnung der Wärmebezugsfläche (WBZ) erfolgt in Abhängigkeit des Gebäudetyps und der Baualtersklasse. Die angenommenen Wärmebezugsflächen sind in Tabelle 3-2 aufgeführt. Zudem sind die angesetzten Raumwärmebedarfswerte dargestellt, die auf einer Studie von Diefenbach & Enseling (2007) zum Gebäudebestand von Hessen basieren. Für die Berechnung des Heizwärmebedarfs der einzelnen Gemeinden werden diese Kennwerte zudem mit der jeweiligen Gradtagzahl bereinigt. Als Referenz dient die für mittlere Verhältnisse in Hessen typische Gradtagzahl von Gießen (3436 Kd). Die verwendeten Kennwerte sind mit einem über alle Gemeinden konstanten Korrekturfaktor ( $K=0,991$ ) versehen, um sicherzustellen, dass der über alle Gemeinden aufsummierte Wärmebedarf mit den Vorgaben der (temperaturbereinigten) deutschen Energiebilanz für den Bedarf an Raumwärme (ca. 510 TWh/a, Nutzwärme) übereinstimmt.

Für den Warmwasserbedarf wird ein für alle Gebäude konstanter, auf die Wohnfläche bezogener Wert von jährlich 20 kWh/m<sup>2</sup> angesetzt. Da der Warmwasserbedarf unabhängig von klimatischen Einflüssen ist, wird dieser erst nach der Gradtagzahlenkorrektur hinzuaddiert. Analog zum Heizwärmebedarf entspricht der kumulierte Warmwasserbedarf über alle Gemeinden der deutschen Energiebilanz, in der ein Wert von ca. 70 TWh/a (Nutzwärme) für Warmwasser ausgewiesen wird.



**Tabelle 3-2: Wärmebezugs- und Raumwärmebedarfswerte in Abhängigkeit von Gebäudetyp und -alter.**

| Gebäudetyp | EFH/ZFH                              |   | KMH                                  |   | GMH                                  |   |
|------------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|---|--------------------------------------|---|
|            | Wärme-<br>bezugsfläche<br>[m², Haus] | spezifischer<br>Raumwärmebedarf<br>[kWh/m², Jahr] | Wärme-<br>bezugsfläche<br>[m², Haus] | spezifischer<br>Raumwärmebedarf<br>[kWh/m², Jahr] | Wärme-<br>bezugsfläche<br>[m², Haus] | spezifischer<br>Raumwärmebedarf<br>[kWh/m², Jahr] |
| Bauperiode |                                      |   |                                      |   |                                      |   |
| < 1900     | 121,37                               | 234,87  | 294,64                               | 218,02  | 709,54                               | 111,98  |
| 1900-1945  | 115,80                               | 227,93  | 265,18                               | 127,84  | 597,51                               | 134,78  |
| 1946-1960  | 123,60                               | 230,90  | 272,55                               | 187,30  | 597,51                               | 135,77  |
| 1961-1970  | 123,60                               | 185,32  | 272,55                               | 166,49  | 597,51                               | 128,83  |
| 1971-1980  | 126,94                               | 141,71  | 276,23                               | 142,70  | 606,85                               | 117,93  |
| 1981-1985  | 140,30                               | 101,08  | 302,01                               | 117,93  | 653,53                               | 117,93  |
| 1986-1995  | 142,53                               | 148,65  | 305,69                               | 98,11   | 653,53                               | 117,93  |
| 1996-2000  | 146,98                               | 110,99  | 313,06                               | 69,37   | 672,20                               | 117,93  |
| > 2000     | 146,98                               | 101,08  | 313,06                               | 64,42   | 672,20                               | 117,93  |

Anhand dieser Informationen erfolgt die Berechnung des flächenspezifischen, gebäudetyp- und altersabhängigen sowie gradtagbereinigten Wärmebedarfs für Wohngebäude einer Gemeinde:

$$HWBWG_{Gemeinde} = \left[ \sum_{GT} \sum_{BP} * SRWB_{GT,BP} * K_{WG} * WBZ_{GT,BP} * \frac{HGT}{HGT_{Ref}} \right] + WBZ_{GT,BP} * WWKZ$$

|                    |   |
|--------------------|---|
| $HWBWG_{Gemeinde}$ | jährlicher Heizwärmebedarf für Wohngebäude je Gemeinde [kWh/a]                            |
| $GT$               | Gebäudetypen  |
| $BP$               | Bauperioden   |
| $SRWB_{GT,BP}$     | spezifischer Raumwärmebedarf in Abhängigkeit vom Gebäudetyp und der Bauperiode [kWh/m²*a] |
| $K_{WG}$           | Korrekturfaktor Wohngebäude   |
| $WBZ_{GT,BP}$      | Wärmebezugsfläche in Abhängigkeit vom Gebäudetyp und der Bauperiode [m²]                  |
| $HGT$              | Heizgradtage der jeweiligen Gemeinde [Kd]   |
| $HGT_{Ref}$        | Heizgradtage der Referenzgemeinde (Gießen [Kd])   |
| $WWKZ$             | Warmwasserkennzahl [kWh/m²*a]   |

### 3.3.2 Nichtwohngebäude

Als Nichtwohngebäude werden allgemein Gebäude bezeichnet, deren Nutzfläche überwiegend keine Wohnfunktion aufweist. Dies macht in der Regel mehr als die Hälfte der Nutzfläche aus. In diese Kategorie fallen insbesondere Büro- und Verwaltungsgebäude, Anstaltsgebäude, landwirtschaftliche und nichtlandwirtschaftliche Betriebsgebäude (z.B. Fabrik- und Handelsgebäude sowie Hotels) sowie sonstige Bauwerke mit spezifischen Funktionen wie etwa Schulgebäude oder Sporthallen.

Gesicherte statistische Angaben zu Nichtwohngebäuden sind in Deutschland nicht vorhanden, da diese nur einmalig im Jahr 1950 statistisch erfasst wurden. Dabei wurde die Gesamtzahl der Nichtwohngebäude erhoben, allerdings ohne weiterführende Differenzierung

nach Größe oder weiteren gebäudebezogenen Attributen (Diefenbach & Enseling 2007). Vor diesem Hintergrund werden die im Kontext einer Studie des Wirtschaftsministeriums zum nationalen Potenzial der KWK ermittelten. Anzahlen der Nichtwohngebäude in Deutschland verwendet (DLR 2005). Eine Auflistung findet sich in Tabelle 3-3.

**Tabelle 3-3: Anzahl und Wärmebedarf (Nutzwärme einschließlich Warmwasser) der Nichtwohngebäude für Deutschland (DLR 2005).**

| Nichtwohngebäudetyp | Anzahl Gebäude [Tsd.] | Wärmebedarf je NWG [MWh/Jahr] | Kummulierter Wärmebedarf [TWh/Jahr] |
|---------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Kleine NWG          | 2123                  | 48                            | 101,9                               |
| Mittlere NWG        | 254                   | 138                           | 35,7                                |
| Große NWG           | 196                   | 432                           | 84,7                                |

Auf Gemeindeebene gibt es kein belastbares statistisches Material zum Bestand an Nichtwohngebäuden. Anders als die Regionalisierung des Wärmebedarfs für Wohngebäude erfolgt daher die Regionalisierung des Wärmebedarfs für Nichtwohngebäude auf Basis statistischer Angaben zu sozialversicherungspflichtig Beschäftigten am Arbeitsort. Diese Informationen liegen gemeindebezogen vor und dienen zur prozentualen räumlichen Disaggregation der in Tabelle 3-3 angegebenen absoluten Anzahl an Nichtwohngebäuden. Die absolute Anzahl der Nichtwohngebäude wird anschließend mit Wärmebedarfswerten der KWK-Potenzialstudie (2005) multipliziert. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 3-3 aufgeführt.

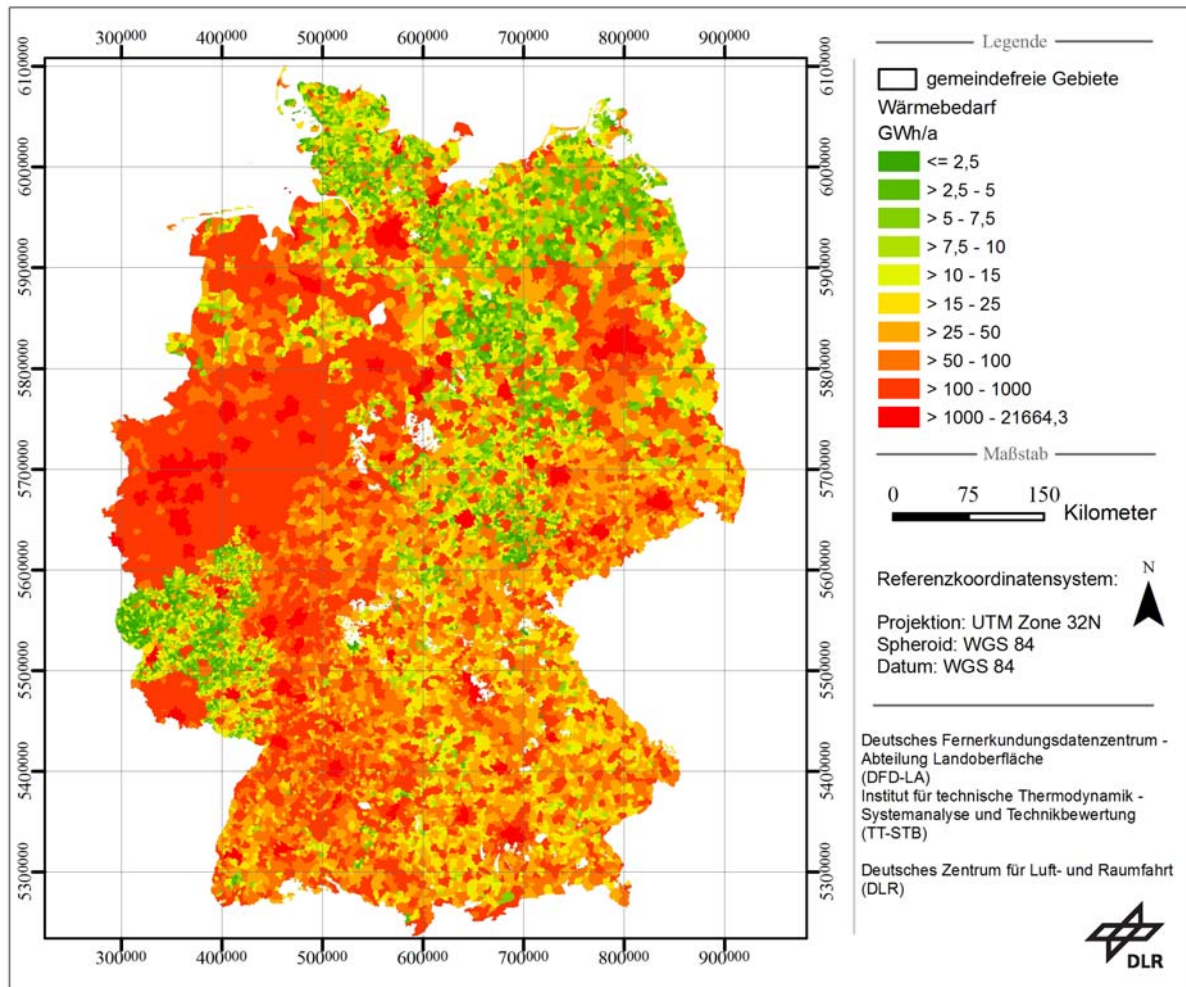
Der kumulierte Bedarf für Raumwärme und Warmwasser der Nichtwohngebäude in Deutschland liegt bei ca. 220 TWh/a (Fischedick et al., 2007). Der jährliche Heizwärmebedarf pro Gemeinde ergibt sich demnach wie folgt:

$$WBNWG_{Gemeinde} = \sum_{GT} SWB_{GT} * K_{NWG} * \frac{HGT}{HGT_{REF}}$$

|                    |   |
|--------------------|---|
| $WBNWG_{Gemeinde}$ | jährlicher Wärmebedarf (inkl. Warmwasser) für Nichtwohngebäude je Gemeinde [kWh/Jahr] |
| $GT$               | Gebäudetypen  |
| $SWB_{GT}$         | spezifischer Wärmebedarf in Abhängigkeit vom Gebäudetyp [kWh, Jahr]                   |
| $K_{WG}$           | Korrekturfaktor Nichtwohngebäude  |
| $HGT$              | Heizgradtage der jeweiligen Gemeinde [Kd]   |
| $HGT_{Ref}$        | Heizgradtage der Referenzgemeinde (Gießen [Kd])                                       |

Der regionalisierte Wärmebedarf für Wohn- und Nichtwohngebäude wird addiert und ist in Abbildung 3-4 gemeindeweise kumuliert ausgegeben. In dieser Darstellung wird die Höhe des für die jeweilige Gemeinde kumulierten Wärmebedarfs stark von der Größe der Gemeindefläche bestimmt. Dieser Zusammenhang zeigt sich idealtypisch in der auffälligen Differenz

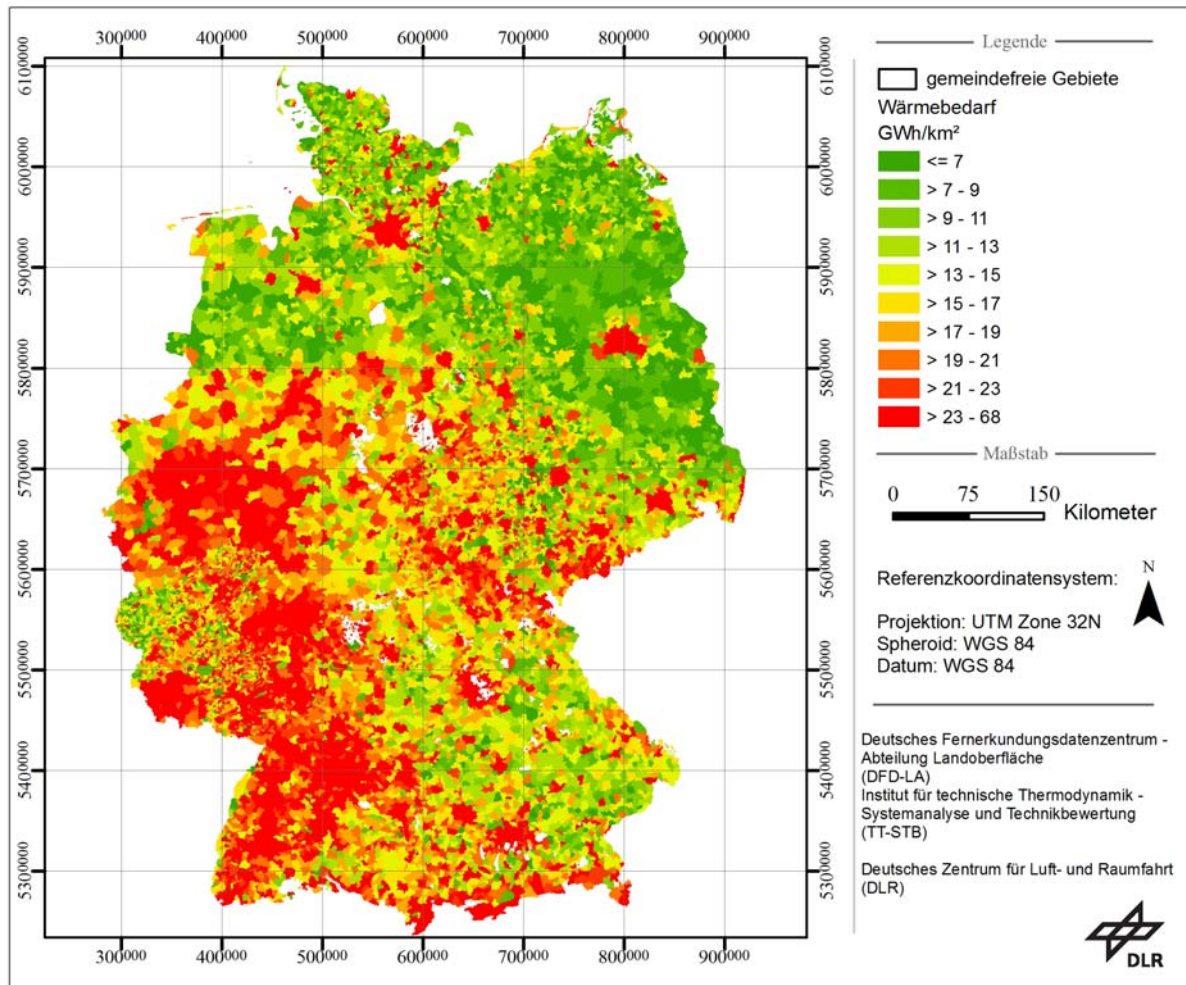
der Wärmebedarfswerte zwischen Rheinland-Pfalz und den angrenzenden Bundesländern. Bis auf wenige urbane Agglomerationen sind die Wärmebedarfswerte in den Gemeinden von Rheinland-Pfalz vergleichsweise niedrig, was direkt auf die im Vergleich zu Gemeinden in Nordrhein-Westfalen oder dem Saarland deutlich kleineren Gemeindeflächen zurückzuführen ist. Die Gemeinde mit dem höchsten kumulierten Wärmebedarf ist Berlin mit ca. 21664 GWh, a.



**Abbildung 3-4: Regionalisierter Wärmebedarf pro Gemeinde.** Die Höhe des für die jeweilige Gemeinde kumulierten Wärmebedarfs wird direkt durch die Größe der Gemeindefläche beeinflusst. Besonders hohe Werte treten im Saarland, Nordrhein-Westfalen, Teilen Niedersachsens, Hessen, Baden-Württemberg und Regionen in Brandenburg auf. Rheinland-Pfalz, Thüringen, Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein hingegen weisen sehr kleinteilige Gemeindestrukturen auf, weshalb der Wärmebedarf dort geringe Werte annimmt.

Eine differenziertere räumliche Struktur lässt sich in der Wärmedichtekarte (Abbildung 3-5) erkennen, da der jährliche Wärmebedarf in Gigawattstunden pro Quadratkilometer Siedlungsfläche [GWh/km<sup>2</sup>] gemeindeweise dargestellt ist. Wie alle folgenden flächenbezogenen Darstellungen basieren die Siedlungsflächen auf den im ATKIS Basis-DLM im Objektbereich „baulich geprägte Fläche“ (2100) ausgewiesenen Siedlungsflächen. Erwartungsgemäß werden die höchsten Dichtewerte in Metropolen und Städten erreicht. Auffällig ist das weitgehend

zusammenhängende, bandförmige Areal, dass von den Städten des Ruhrgebiets Richtung Süden verläuft, den Großraum Frankfurt umfasst und über die Region Stuttgart entlang des Rheins bis nach Freiburg reicht und durchgehend von hohen Wärmedichten gekennzeichnet ist. Dagegen weisen große Areale Brandenburgs und Mecklenburg-Vorpommerns eine niedrige Wärmedichte auf.

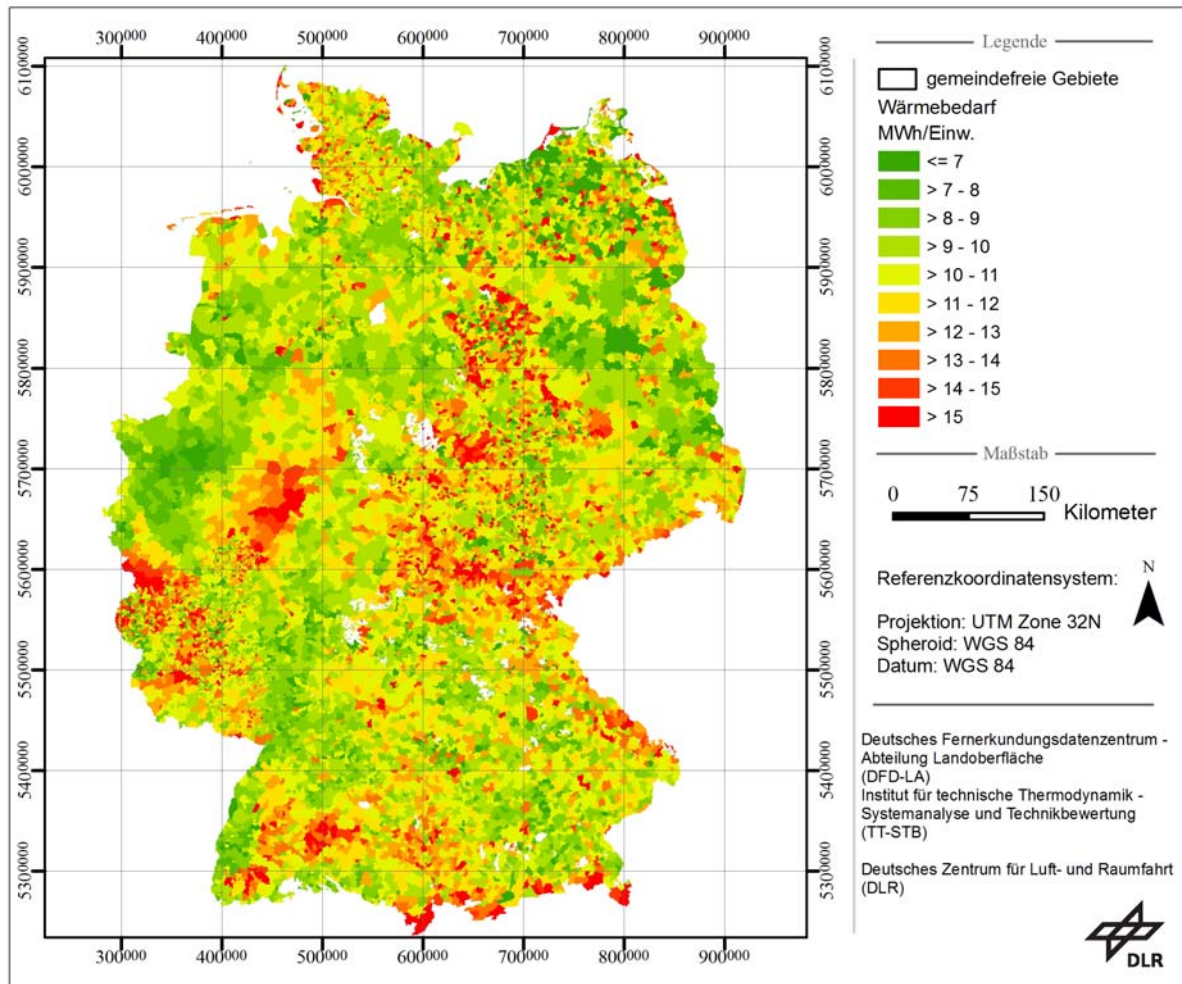


**Abbildung 3-5: Regionalisierter Wärmebedarf pro Gemeinde bezogen auf die Siedlungsfläche.** Dieses Maß wird auch als Wärmedichte bezeichnet, wobei die höchsten Dichtewerte erwartungsgemäß in Metropolen und Städten auftreten.

In Abbildung 3-6 ist der regionalisierte jährliche Wärmebedarf der Einwohnerzahl gegenübergestellt. Dabei zeigen sich deutliche regionale Unterschiede - in manchen Gemeinden liegt der Wärmebedarf pro Einwohner um ein Mehrfaches über dem Wärmebedarf pro Einwohner anderer Gemeinden. Vor allem die Siedlungsstruktur und die damit einhergehenden Wohnsituationen haben einen gewichtigen Einfluss auf die Ausprägung dieses Parameters. Große Städte und Verdichtungsräume haben einen vergleichsweise niedrigen Wärmebedarf pro Einwohner, während in ländlichen Kreisen der Wärmebedarf pro Einwohner häufig entsprechend hoch ist. Auch weisen Gemeinden, deren Baustruktur besonders von alten EFH/ZFH dominiert wird, einen entsprechend hohen Wert auf. Zudem kann eine hohe Zahl



an sozialversicherungspflichtig Beschäftigten am Arbeitsort mit entsprechend hohem Wärmebedarf der Nichtwohngebäude in Verbindung mit relativ wenig Einwohnern einen hohen Wert induzieren (vgl. Abbildung B VI, Anhang B). Besonders die hohen Werte am Alpenrand und in Bereichen der Mittelgebirge zeigen, dass die klimatische Situation eine wichtige raumstrukturelle Komponente hinsichtlich der Verteilung des Wärmebedarfs darstellt.



**Abbildung 3-6: Regionalisierter Wärmebedarf pro Gemeinde bezogen auf die Einwohnerzahl.** Die Ausprägung wird insbesondere durch die Siedlungsstruktur und die damit einhergehenden Wohnsituationen geprägt. Der Wärmebedarf pro Einwohner ist für große Städte und Verdichtungsräume vergleichsweise niedrig. Analog ist der Wärmebedarf pro Einwohner in ländlichen Kreisen häufig entsprechend hoch. Für die Regionalisierung des Wärmebedarfs für Nichtwohngebäude werden Angaben über sozialversicherungspflichtig Beschäftigten am Arbeitsort integriert. Entsprechend kann der Wärmebedarf der Nichtwohngebäude in Verbindung mit einer relativ geringen Einwohnerzahl in einem hohen Wert resultieren.

### 3.4 Analyse der Wärmeinfrastruktur

Für die Bewertung der Wärmeinfrastruktur werden sowohl die Längen und zugehörigen Kosten der Hauptverteilungs- und Hausanschlussleitungen eines Wärmenetzes abgeschätzt, als auch die Aufwendungen für Hausübergabestationen und für eine konventionelle Wärmebereitstellung (Heizkessel für Öl und Gas) integriert. Da die gebäudebestandsbezogenen In-

formationen des Infas-Datensatzes nur auf Gemeindeebene vorliegen und damit eine detaillierte, kleinräumige Berechnung der Leitungen unter explizierter Berücksichtigung der Lage der jeweiligen Gebäude nicht möglich ist, dienen neben den Straßenvektoren die aus der DTK25-V extrahierten Gebäudegrundrisse als Basis für die Berechnungen. Anders als die Top-Down Regionalisierung des Wärmebedarfs und die Abschätzung der Kosten für Hausübergabestationen und Heizkessel kann die Leitungskostenberechnung somit auf Basis eines Bottom-Up Ansatzes erfolgen.

### 3.4.1 Extraktion der Gebäudegrundflächen

Ein zentraler Verfahrensschritt für die Berechnung von Hauptverteilungs- und Hausanschlussleitungen ist die Extraktion von Gebäudegrundrissen aus der rasterbasierten DTK25-V. Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, sind die Gebäudegrundrisse in der gegenwärtig erhältlichen Version der DTK25-V nicht als gesonderter Layer verfügbar. Stattdessen liegen die Informationen als Binärlayer mit weiteren Signaturen wie etwa Verkehrs- und Grenzlinien, Vegetationsschraffuren sowie Schriftzügen vor. In einem mehrstufigen Prozess werden die Gebäude daher unter Anwendung von Methoden der DBA von den übrigen, nicht erwünschten Signaturen separiert.

Die einzelnen Verarbeitungsschritte der Gebäudeextraktion bzw. deren Ergebnisse sind in Abbildung 3-7 illustriert. Die Extraktion der Gebäudegrundrisse aus den Rasterinformationen der DTK25-V für ganz Deutschland erfolgt auf Basis eines Regelwerks, das mittels der objektorientierten Bildverarbeitungssoftware eCognition Developer 8.0 entwickelt und angewendet wird. Abbildung 3-7a zeigt einen Ausschnitt der DTK-25-V, die als Grundlage zur Ableitung des Gebäudelayers dient. In einem ersten Prozessierungsschritt werden diese Rasterdaten vektorisiert, wobei alle zusammenhängenden schwarzen Volltondarstellungen zu jeweils einem Objekt zusammengefasst werden (siehe Abbildung 3-7b, rote Objekte). Anschließend werden Kleinstobjekte, wie etwa Punktsignaturen, aus dem Vektordatensatz entfernt (siehe Abbildung 3-7c).

Typisch für die DTK25-V sind Straßenbegrenzungslinien, die in der gegebenen Darstellungsweise oftmals verschiedene Gebäude miteinander verbinden – zu sehen an den zusammenhängenden Gebäuden in der oberen Querstraße in Abbildung 3-7c. Für die Trennung und Identifizierung einzelner Gebäude werden die Bildobjekte daher einer sogenannten „Erosion“ unterzogen, die eine morphologische Basisoperation der digitalen Bildverarbeitung darstellt. Dadurch lässt sich ein Großteil der linienhaften Signaturen entfernen (Abbildung 3-7d). Kleine Objekte mit einer Größe von bis zu 100 Pixel werden anschließend auf Basis von geometriebezogenen Parametern - z.B. Breite und Kompaktheit - bewertet, um eine Trennung zwischen tatsächlichen Gebäuden und verbleibenden Signaturfragmenten zu ge-

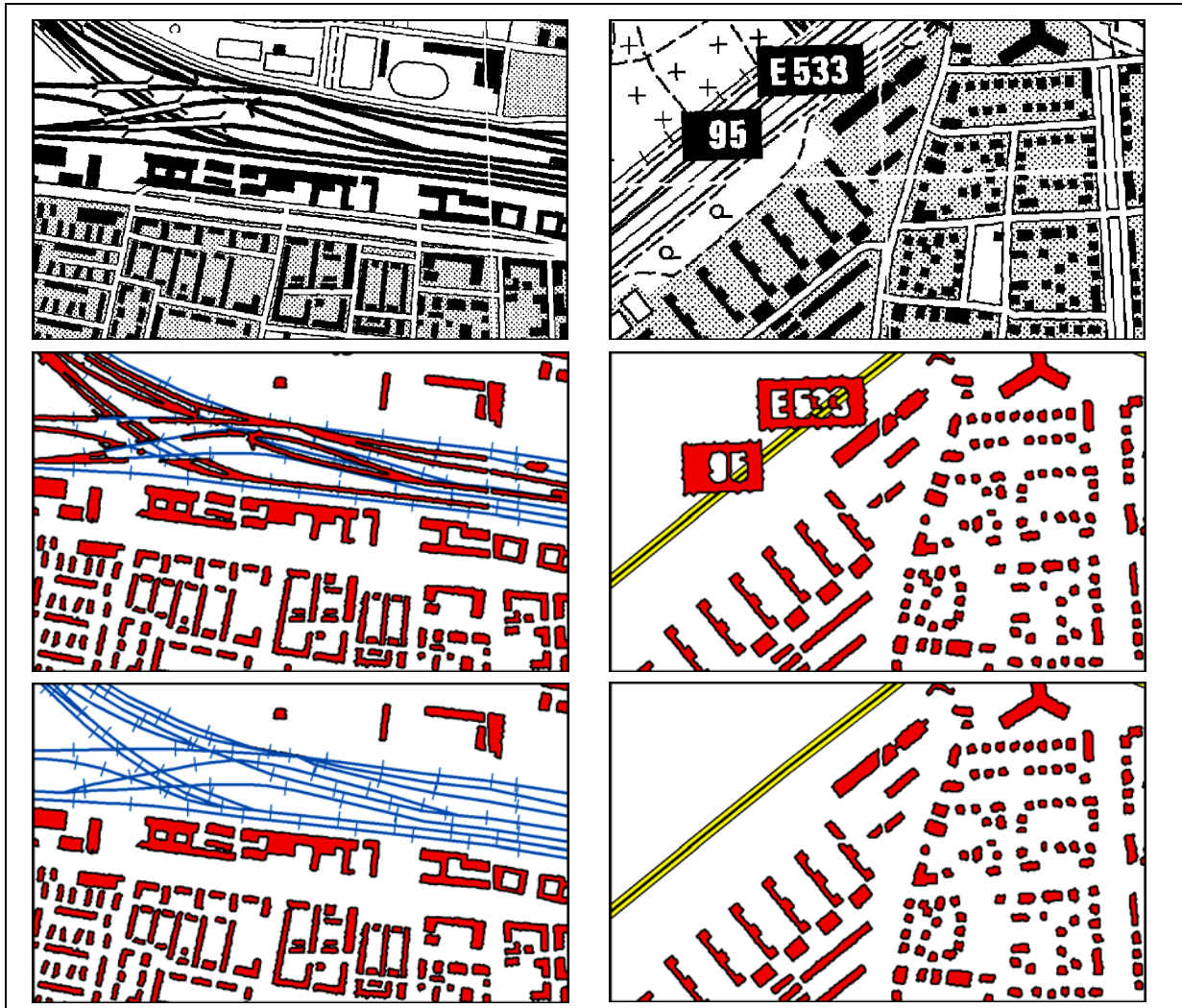
währleisten. Die verbleibenden Signaturfragmente werden nachfolgend iterativ aus dem Datensatz entfernt (siehe Abbildung 3-7e-f). Alle Objekte, bei denen eine Erosion durchgeführt wurde, werden abschließend zur Wiederherstellung der ursprünglichen Gebäudeabgrenzung einer Dilatation unterzogen, d.h. die im Rahmen der Erosion verringerte Grundfläche der Objekte wird wieder auf das ursprüngliche Ausmaß ausgedehnt.



**Abbildung 3-7: Verarbeitungsschritte der automatisierten Gebäudeextraktion.** Ausgehend von den Rasterdaten der DTK25-V in schwarzer Volltondarstellung (a) wird zunächst eine Vektorisierung (b) aller zusammenhängender Volltondarstellungen zu einem Objekt durchgeführt (rot). Im Anschluss werden Kleinstobjekte (c) und linienhafte Signaturen (d) durch „Erosion“ entfernt und verbleibende Signaturfragmente (e) über eine iterative Korrekturprozedur (f) beseitigt. Abschließend wird die ursprüngliche Gebäudebegrenzung – die durch die vorherigen „Erosions“-Prozeduren verkleinert wurde, über eine „Dilatation“ wieder in ihre ursprüngliche Ausdehnung überführt.

Im Rahmen der Arbeiten hat sich gezeigt, dass sich bestimmte Verkehrssignaturen - vor allem Beschriftungen von Autobahnen oder Liniensignaturen von Bahnstrecken - nicht vollständig eliminieren lassen, da sie Gebäuden in ihren geometrischen Eigenschaften (z.B. Form, Größe) oftmals zu ähnlich sind. Daher werden diese fehlerhaften Gebäudeobjekte durch zusätzliche Verarbeitungsschritte entfernt. Zum Einen wird dazu der Verkehrslayer VER02\_I aus ATKIS genutzt, der den Verlauf des Schienennetzes repräsentiert. Unter Nutzung des Schienennetzes werden alle Gebäudeobjekte, die sich in bis zu fünf Metern Abstand zu Bahntrassen befinden, gelöscht (siehe Abbildung 3-8, links). Dabei handelt es sich vorwiegend um linienförmige Fragmente, die keine eigenständigen Objekte repräsentieren. Zum Anderen wird der Verkehrslayer VER01\_L (Straßenverkehr) aus ATKIS verwendet, um die bereits erwähnte Beschriftung der Autobahnen und Bundesstraßen zu entfernen. Dazu

werden alle Objekte, die eine dieser zwei Straßentypen überspannen, gelöscht (siehe Abbildung 3-8). In Abbildung 3-8 (rechts) ist zudem der Effekt erkennbar, dass Blattschnittgrenzen in der DTK25-V mitunter noch als weißer Rand bzw. weiße Linien in Erscheinung treten. Dies kann dazu führen, dass einzelne Häuser durch diese weiße Signatur geteilt und somit als zwei getrennte Objekte repräsentiert werden.



**Abbildung 3-8: Identifizierung und Eliminierung falscher Gebäudeobjekte aus dem Ergebnis der Gebäudeextraktion unter Nutzung von ATKIS-Daten.** Links ist die Entfernung von Schienensignaturen, rechts die von Straßenbeschriftungen mit Hilfe von Zusatzdaten (ATKIS) dargelegt. Die im ersten Verarbeitungsschritt extrahierten Gebäude sind in rot dargestellt, die Zusatzdaten des ATKIS-Layers „Bahnkörper“ in blau und die des Layers „Straßen“ in gelb.

Für die Analyse des Wärmenetzpotenzials sind nur Gebäude der Nutzungsarten Wohnbauflächen (ATKIS-Objektart 2111), Industrie- und Gewerbeflächen (ATKIS-Objektart 2112), Flächen gemischter Nutzung (ATKIS-Objektart 2113) sowie Flächen besonderer funktionaler Prägung (ATKIS-Objektart 2114) relevant. Vor diesem Hintergrund wird zunächst der ATKIS-Siedlungslayer modifiziert, indem irrelevante Nutzungsflächen beseitigt werden. Dies ermöglicht zugleich eine Reduzierung der Datenmenge und des Prozessierungsaufwands. Der daraus resultierende ATKIS-Siedlungslayer wird nun dazu verwendet alle Bauwerke aus



dem bisherigen DTK25-V basierten Gebäudedatensatz zu entfernen, die nicht in die Kategorie Siedlungsfläche fallen (z.B. Scheunen).

Die extrahierten Gebäudepolygone dienen als Grundlage für die Berechnung der Wärmeleitungen. Ein Vergleich zwischen der absoluten Anzahl an Gebäudepolygonen, die auf Basis der vorgestellten Methode extrahiert wurden, und Gebäudepolygonen aus der DTK25, die für München ohne kombinierte Signaturen o.ä. vorliegen, zeigt eine Überschätzung von 3,6 %. Eine visuelle Inspektion der beiden Datensätze legt die Vermutung nahe, dass die Überschätzung primär auf Schrift- und Signaturfragmente zurückzuführen ist, die im Zuge des Extraktionsverfahren in Einzelfällen nicht identifiziert und ausgeschlossen werden konnten. Ein Vergleich mit einer Referenzkartierung von nicht generalisierten Gebäudepolygonen war aufgrund fehlender Referenzdaten nicht möglich.

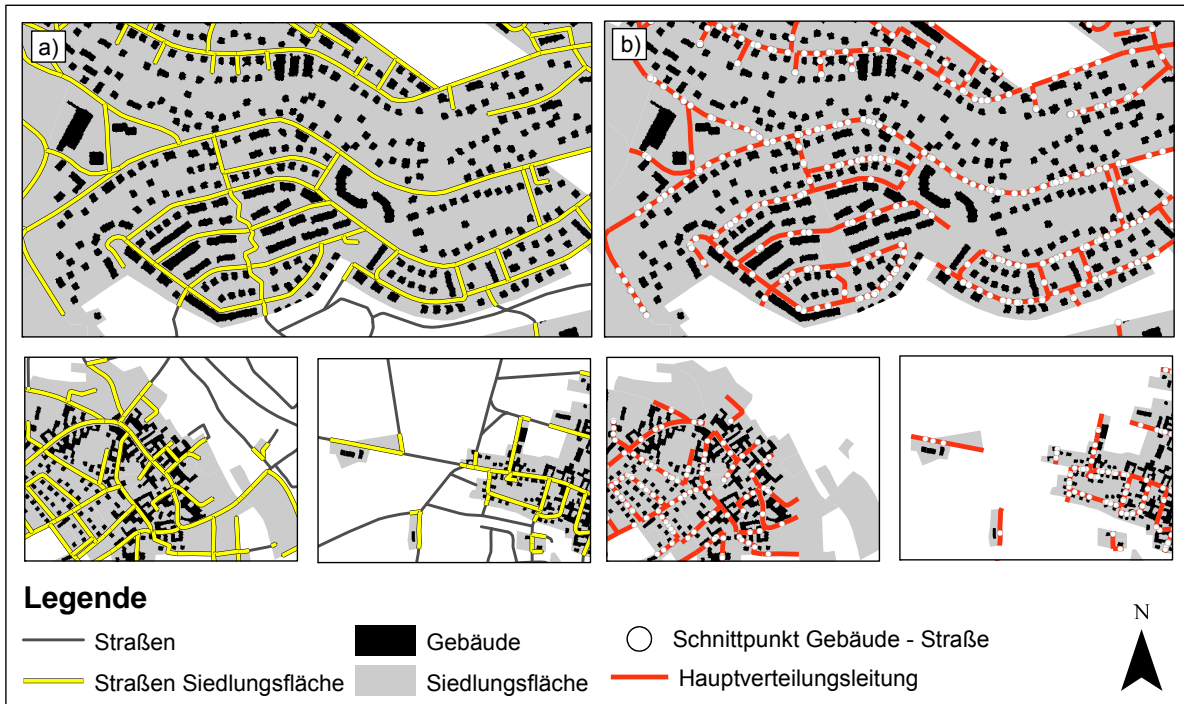
### 3.4.2 Berechnung der Hauptverteilungs- und Hausanschlussleitungen

Die Hauptverteilungsleitung eines Nahwärmenetzes wird in der Regel entlang der bestehenden Straßen verlegt (Fischedick et al., 2007). Demnach lassen sich die Länge und die damit verbundenen Kosten zur Verlegung der Rohrleitungen eines Nahwärmenetzes auf Basis des Straßennetzwerkes realitätsnah abbilden. Auch hier dienen die Straßengeometrien, die als entsprechende Vektoren im ATKIS Basis-DLM (VER01\_I) enthalten sind, als Grundlage.

Es ist zu beachten, dass die Ausweisung der Potenzialwerte nicht die explizite Wahl eines oder mehrerer Kraftwerksstandorte voraussetzt, sondern in Abhängigkeit der baulichen Strukturen des jeweiligen Baublocks erfolgt. Wie in Kapitel 2 angeführt, lassen sich zur Wärmeerzeugung verschiedenartige Energieträger und Erzeugungstechniken einsetzen. Beispielsweise sind Anlagen, die Biomasse verwerten, eher außerhalb des Siedlungsgebietes zu suchen, während KWK-Anlagen bereits zur Revitalisierung von Stadtbrachen und Neunutzung von innerstädtischen Freiflächen installiert werden (Genske et al., 2009). Eine Ausweisung von geeigneten Kraftwerksstandorten ist demnach nur unter expliziter Betrachtung einzelner Energieerzeugungstechniken sinnvoll, was beispielsweise Scharding (2008) für Biogasanlagen vornimmt. Für eine derartige Analyse sind im Vorfeld zudem funktionale räumliche Einheiten zu definieren, innerhalb derer optimale Netzlängen mit einer definierten Anzahl an potentiellen Kraftwerksstandorten berechnet werden können.

Da für die Analyse der physisch-strukturellen Wärmenetzpotenziale keine derartigen Verfahrensspezifikationen getroffen werden, wird für die Berechnung der Längen der Hauptverteilungsleitungen ein Netzgraph auf Basis kleinster siedlungsstruktureller Grundeinheiten generiert. Dazu wird der Straßendatensatz zunächst auf die Siedlungsflächen reduziert (Abbildung 3-9a). Anschließend werden Schnittpunkte zwischen Gebäuden und den jeweiligen nächstgelegenen Straßenabschnitten gebildet, um Straßenabschnitte zu identifizieren,

die ein möglichst effizientes Hauptverteilungsnetz repräsentieren können. Dabei wird nicht zwingend ein innerhalb geschlossener Siedlungsbereiche integrierender Netzgraph generiert, wenngleich räumlich-strukturell zusammenhängende Gebiete in der Regel eine geschlossene Versorgungsstruktur erhalten (Abbildung 3-9b).



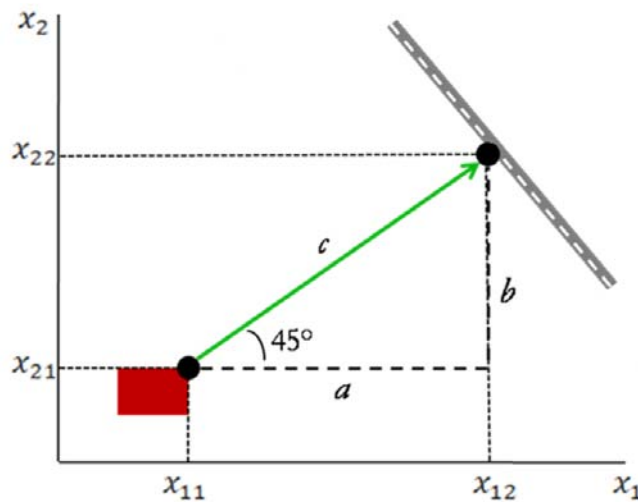
**Abbildung 3-9: Berechnung der Länge von Hauptverteilungs- und Hausanschlussleitungen.** Dargestellt sind das Straßennetz innerhalb der Siedlungsflächen (a) und identifizierte Straßenabschnitte, die ein effizientes Hauptverteilungsnetz repräsentieren können (b). Um diese Straßenabschnitte zu identifizieren, werden im Vorfeld virtuelle Schnittpunkte zwischen Gebäude nächstgelegenen Straßenabschnitt gebildet.

Der Berechnung des Schnittpunktes zwischen Gebäude und Straßen geht bereits eine räumliche Abfragefunktion („spatial join“) voraus. Diese beinhaltet gleichzeitig die Längenberechnung der Hausanschlussleitungen und basiert auf der Berechnung der euklidischen Distanz zwischen Gebäude und nächstgelegener Straße. Die räumliche Entfernung zwischen zwei Punkten kann nach dem Satz des Pythagoras über die Hypothenusenlänge  $c$  eines rechtwinkligen Dreiecks berechnet werden, die sich aus der Wurzel der quadrierten Strecken  $a$  und  $b$  (An- und Gegenkathete) ergibt:  $c = \sqrt{a^2 + b^2}$  (Abbildung 3-10).

Auf diesem Berechnungsprinzip basieren euklidische Distanzmetriken. Dabei wird das Distanzmaß für die Entfernung zwischen zwei Objekten ( $i$  und  $k$ ) über die gegebene Anzahl an  $j$  Variablen ( $j = 1, \dots, n$ ) nach Martens (2003) als Distanz  $d_{ik}$  bezeichnet und ist allgemein definiert als:

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_{kj})^2}$$

Der auf diese Weise generierte Netzgraph wird unter Berücksichtigung topologischer Beziehungen räumlich disaggregiert. Hierfür wird die Länge eines Netzabschnittes durch die Anzahl der Gebäude dividiert, die zu diesem nächstgelegenen sind. Die resultierenden Teilabschnitte werden den Gebäuden gleichwertig zugeschrieben. Auf diese Weise lässt sich für jedes Gebäude die Länge des Abschnitts des Verteilnetzes und der Anschlussleitung berechnen.

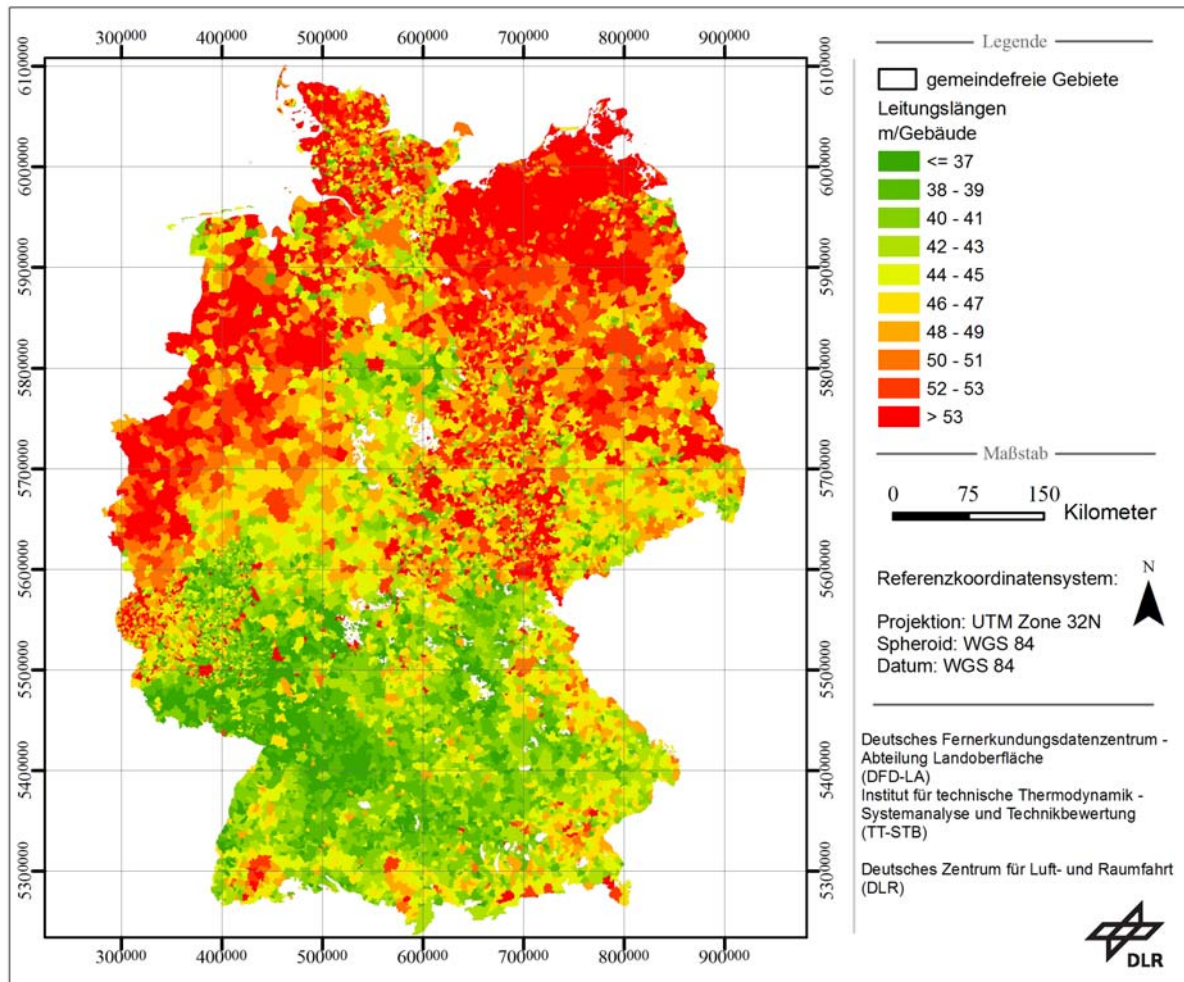


**Abbildung 3-10: Berechnung der Euklidischen Distanz** (veränderte Darstellung in Anlehnung an Martens, 2003). Der Abstand zwischen der jeweiligen Hauskante und der nächstgelegenen Straße entspricht der euklidischen Distanz.

Erweiterungs- und Verbesserungsmöglichkeiten des vorgestellten, primär auf Rechenzeit optimierten Ansatzes, ergeben sich aus der Generierung optimaler, distanzminimierter Netzgraphen, beispielsweise unter Verwendung von „Minimum Spanning Trees“. Im Vorfeld wären zudem Siedlungsstrukturen zu identifizieren, für die eine Netzauslegung auf Grund z.B. einer sehr geringen Wärmedichte wenig sinnvoll ist (Hierzu müsste der Wärmebedarf entsprechend kleinräumig regionalisiert werden können) und demnach nicht in die Potenzialbewertung eingehen. Der Anteil der Überschätzung der Leitungslängen, die auf das Extraktionsverfahren der Gebäudepolygone zurückzuführen ist, spielt mit einer positiven Abweichung von 1,2 % für das Referenzgebiet München eine eher untergeordnete Rolle.

In Abbildung 3-11 sind die berechneten Leitungslängen in Beziehung zu den erschlossenen Gebäuden gesetzt [m/Gebäude]. Umso niedriger dieser Wert ist, desto besser sind die jeweiligen Siedlungsstrukturen hinsichtlich ihrer räumlichen Anordnung für eine Netzauslegung geeignet - allerdings hängen die eigentlichen Netzkosten neben der Länge des Netzes auch noch von anderen Parametern ab (vgl. Kapitel 3.4.3; Abbildung 3-16, Baukosten pro m Trasse), was eine räumliche Verschiebung der gut und weniger gut geeigneten Gemeinden hinsichtlich der Netzkosten induzieren kann. Bezüglich der Leitungslängen pro Gebäude zeigen sich deutliche Unterschiede: Während die Leitungslängen in den südlichen Bundesländern,

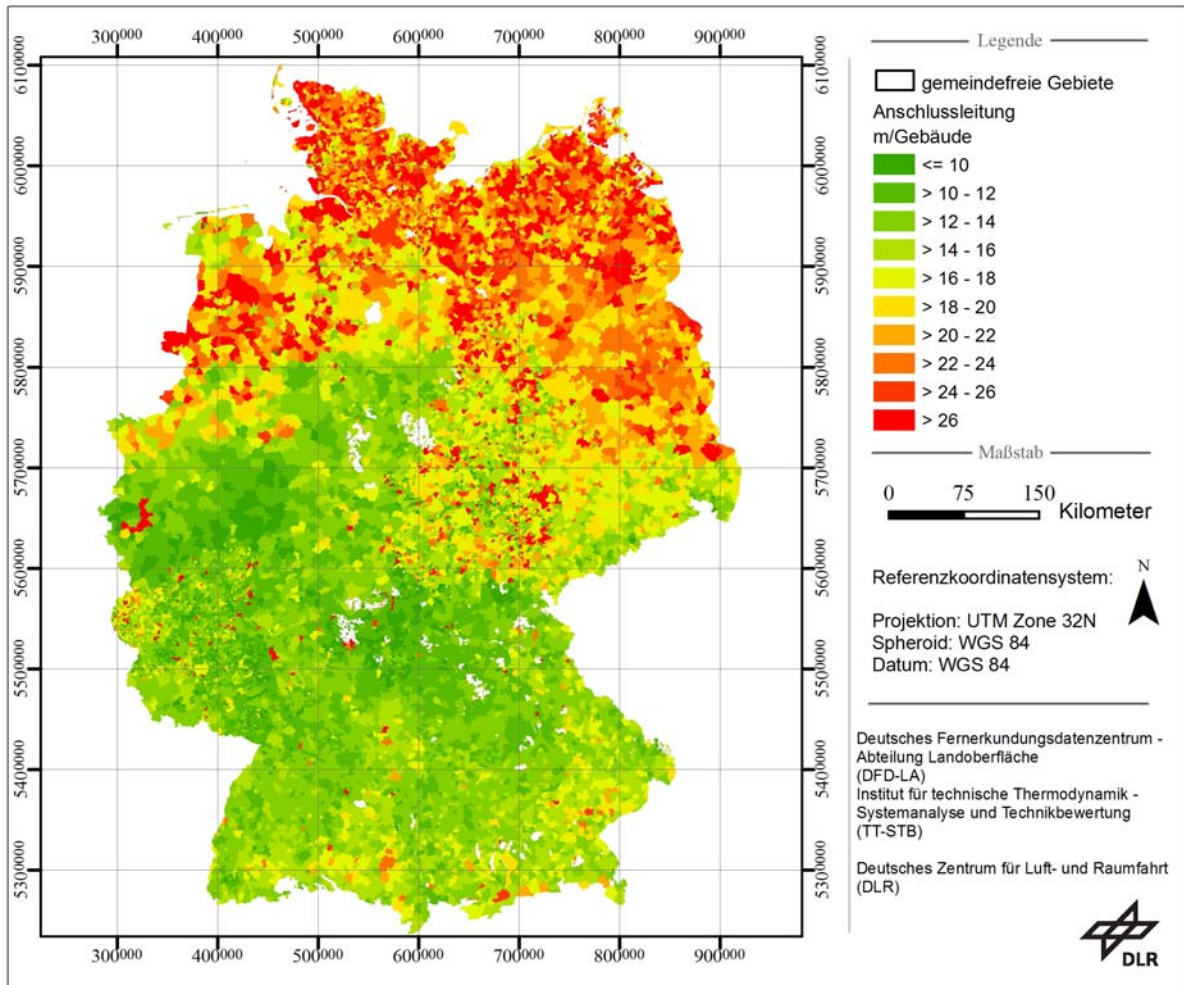
insbesondere Baden-Württemberg und Hessen relativ niedrige Werte aufweisen, sind die Leitungslängen besonders in Mecklenburg-Vorpommern, in zahlreichen Gemeinden Brandenburgs sowie in westlichen Bereichen von Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen relativ lang. Eine Aufteilung der Leitungslängen nach Hauptverteilungsleitung und Anschlussleitung pro Gebäude zeigt noch differenzierter räumliche Unterschiede.



**Abbildung 3-11: Leitungslängen in Bezug zu erschlossenen Gebäuden.** Umso niedriger dieser Wert ist, desto besser sind die jeweiligen Siedlungsstrukturen hinsichtlich ihrer räumlichen Anordnung für eine Netzauslegung geeignet. Die Längen der Leitungen in den südlichen Bundesländern, insbesondere Baden-Württemberg und Hessen sind vergleichsweise kurz, während die Leitungslängen gerade in Mecklenburg-Vorpommern und in zahlreichen Gemeinden Brandenburgs sowie im westlichen Bereich von Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen hohe Werte pro Gebäude aufweisen.

Abbildung 3-12 zeigt die regional sehr unterschiedlichen Längen der Hausanschlussleitungen, welche vom mittleren Abstand der Gebäude zur Erschließungsstraße abhängen. Im mittleren Bereich Deutschlands stehen die Gebäude relativ dicht an den Straßen. Die typische Länge der Hausanschlüsse beträgt kaum mehr als 10 m. Im Norden und Nordosten sind dagegen Längen der Hausanschlussleitungen von über 25 m noch häufig anzutreffen. Dies wirkt sich ungünstig auf das Nahwärmepotenzial im Norden Deutschlands aus.

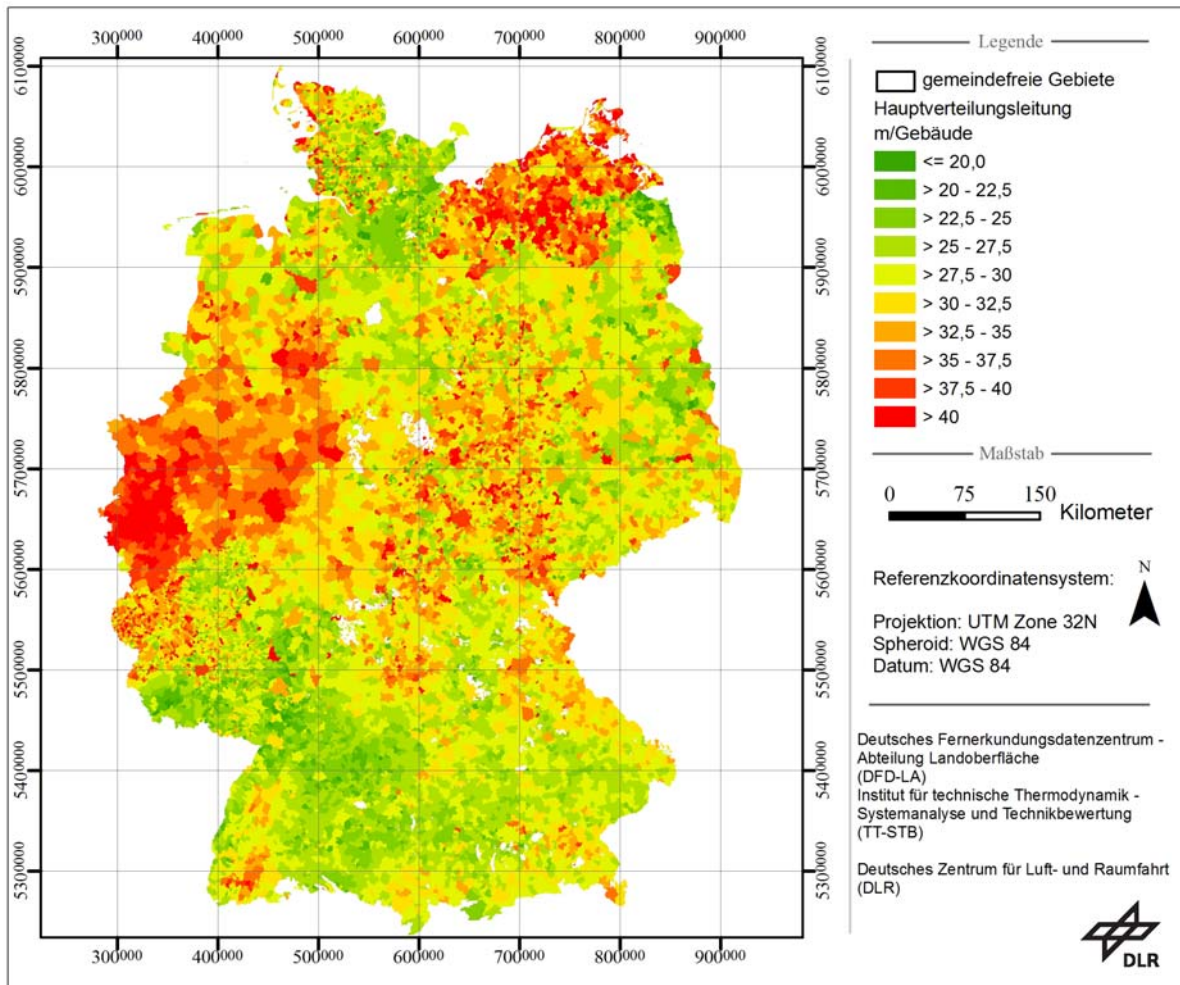




**Abbildung 3-12: Längen der Anschlussleitung pro Gebäude.** Die regional sehr unterschiedlichen Längen der Hausanschlussleitungen beschreiben den mittleren Abstand der Gebäude von der Erschließungsstraße. Besonders hohe Werte treten in Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg auf.

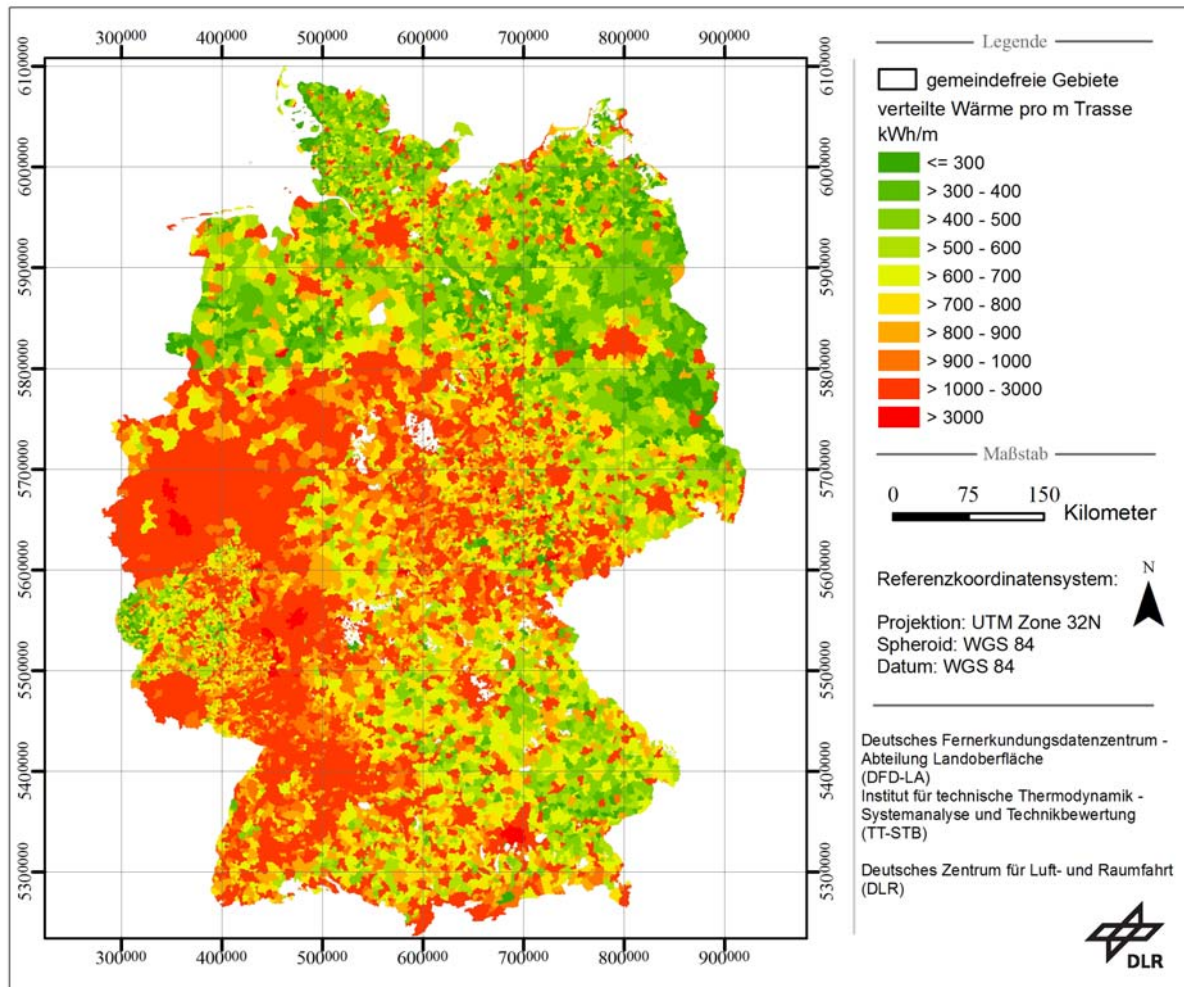
Hinsichtlich der Längen der Hauptverteilungsleitungen pro Gebäude, deren Anteil an den gesamten Leitungslängen in der Regel größer ist, wird dieser Befund teilweise relativiert (Abbildung 3-13).

Im Norden Deutschlands weisen die Hauptleitungen eine typische Länge von unter 25 m je Gebäude auf. Dies deutet darauf hin, dass dort die Gebäude ähnlich dicht zusammenstehen wie im Süden, der Abstand der Häuserfront von den Erschließungsstraßen hingegen hier deutlich höher ist. Im Nordosten wird auch für die Hauptleitungen ein hoher Wert von über 35 m je Gebäude angetroffen. Im Nordosten ist daher die Siedlungsstruktur als insgesamt ungünstig für eine Realisierung von Wärmenetzen anzusehen. Auch die dicht besiedelten Gebiete Nordrhein-Westfalens weisen hohe Längen für die Hauptleitungen aus. Anders als im Nordosten Deutschlands dürfte die Ursache im größeren Anteil an Mehrfamilienhäusern und Nichtwohngebäude begründet sein.



**Abbildung 3-13: Längen der Hauptverteilungsleitung pro Gebäude.** Im Norden und in weiten Teilen Süddeutschlands weisen die Hauptverteilungsleitungen eine Länge von unter 25 m je Gebäude auf, während besonders im Nordosten und in den westlichen Bereichen von NRW die Leitungslängen mit über 35 m je Gebäude vergleichsweise lang sind. Diese Siedlungsstrukturen sind hinsichtlich dieses Parameters als eher ungünstig zu bezeichnen.

In Abbildung 3-14 ist der Wärmebedarf der berechneten Länge der Wärmenetze gegenübergestellt (verteilte Wärme pro Meter Trasse). Diese Information kann hilfreich sein hinsichtlich der Identifikation von Gemeinden, die eine Fördergrenze über bzw. unterschreiten. In Deutschland liegt beispielsweise die Fördergrenze des Marktanreizprogramms bei 500 kWh/m. Da die Berechnung der Leitungslängen sicherlich noch optimierbar ist und besonders die Längen der Hauptverteilungsleitungen eher überschätzt werden, ist in diesem Zusammenhang weniger von einer relativen Verschiebung der räumlichen Ausprägung der Werte auszugehen, sondern vielmehr von einer Herabsetzung des Niveaus der absoluten Wertebereiche.



**Abbildung 3-14: Gegenüberstellung von Wärmebedarf und berechneter Länge der Wärmenetze.** Dieser Parameter quantifiziert die verteilte Wärme pro Meter Trasse. Die Information kann beispielsweise hinsichtlich der Identifikation von Gemeinden hilfreich sein, die eine Fördergrenze über bzw. unterschreiten. Neben den großen Städten sind die günstigsten Werte in verdichteten Gemeinden Nordrhein-Westfalens sowie entlang der Achse Frankfurt-Stuttgart zu finden. Im Gegensatz dazu werden Gemeinden mit vergleichsweise niedrigen Werten im ländlichen Raum Norddeutschlands und Bayerns ausgewiesen.

### 3.4.3 Baukosten von Wärmeleitungen

Bei der Ermittlung des Potenzials von Wärmenetzen spielen die Kosten dieser Netze eine entscheidende Rolle. Sie hängen in erster Linie von der Länge der Trasse ab. Durch eine Auswertung der amtlichen topographischen Karte lassen sich Trassenlängen für mögliche Wärmenetze ermitteln. Zusätzlich beeinflussen weitere Kenngrößen die Kosten der Netze wie z.B. der Durchmesser der Leitungen und die örtlichen Gegebenheiten mit Bezug auf die Topographie.

Der mittlere Durchmesser der Leitungen hängt von der Größe des zu versorgenden Gebiets und damit von der thermischen Leistung der Heizzentrale sowie von der mittleren Größe und dem Wärmebedarf der angeschlossenen Gebäude ab. Ersteres bestimmt den Durchmesser der Hauptleitungen in der Nähe der Heizzentrale, letzteres den Durchmesser der Hausan-

schlussleitungen. Da im Rahmen der vorliegenden Untersuchung keine Netzauslegungen durchgeführt und somit auch keine Angaben zur Größe der Heizzentralen gemacht werden können, muss mit mittleren Leitungsdurchmessern für typische Versorgungsgebiete gerechnet werden. Gemäß eines Standardwerks der Fernwärmeversorgung (Winkens, 1985) liegt der mittlere Durchmesser der Leitungen des Unterverteilungsnetzes in Einfamilienhaussiedlungen bei 60 mm und in städtischer Bebauung zwischen 70 mm und 81 mm. Für die Hausanschlüsse werden Werte zwischen 25 mm - beispielsweise für Ein- und Zweifamilienhäuser - und 32 mm für größere Gebäude wie etwa Mehrfamiliengebäude angegeben. Insgesamt kann daher in Gebieten mit geringen Wärmedichten - wie etwa Vorortsiedlungen oder ländlichen Gemeinden - mit einem um etwa eine Nennweitenklasse<sup>2</sup> geringeren Durchmesser gerechnet werden als in städtisch geprägten Gebieten mit hohen Anteilen an Mehrfamilienhäusern oder Nichtwohngebäuden.

In Stadtzentren ist das Verlegen von Wärmeleitungen wesentlich kostenintensiver als in ländlichen Gebieten, da einerseits die Dichte bereits vorhandener Leitungen und Kabel sehr hoch und eine Verlegung zusätzlicher Leitung wesentlich komplexer ist. Zum anderen ist auch der Straßenaufbruch bzw. der anschließende -aufbau bedeutend aufwändiger. Hinzu kommt, dass auch für die Verkehrssicherung während der Bauarbeiten ein höherer Aufwand betrieben werden muss. Systematische Untersuchungen zu den unterschiedlichen Verlegekosten in ländlichen und städtischen Gebieten sind nicht bekannt. Vergleiche zwischen Kostenauswertungen im Marktanreizprogramm (MAP) (Nast et al., 2009), in dessen Rahmen überwiegend Wärmenetze im ländlichen Raum gefördert wurden, und Erfahrungen von Ingenieurbüros mit der bisher in Deutschland üblichen Verlegung in städtischen Gebieten zeigen jedoch, dass der Einfluss der örtlichen Gegebenheiten auf die Baukosten deutlich größer ist als der Einfluss einer größeren Nennweite (DN). Dies kann auch an Abbildung 3-15 abgelesen werden, in welcher die Baukosten von Wärmeleitungen dargestellt sind. Deutlich werden die geringen Kosten im ländlichen Raum sowie in Finnland, wo die Wärmedichten deutlich niedriger sind als bei der in Deutschland üblichen Fernwärmeerschließung im städtischen Raum. Die geringen Kosten in skandinavischen Ländern, für die das in Abbildung 3-15 dargestellte Finnland ein Beispiel ist, erklären sich wenigstens zum Teil dadurch, dass dort der Anteil von Fernwärme auch in Gebieten außerhalb der Stadtzentren hoch ist.

In der vorliegenden Studie bietet sich als Indikator für die örtlichen Gegebenheiten der jährliche Wärmeabsatz je Meter Trassenlänge  $q_{\text{Trasse}}$  an. In ländlichen Gemeinden ist dieser gering. In dem in Abbildung 3-15 dargestellten Beispiel des Bioenergiedorfes Mauenheim mit mittleren Baukosten von 180 €/m kann etwa mit einem Wärmeabsatz von 600 kWh/m,a ge-

---

<sup>2</sup> Eine Erhöhung der Nennweitenklasse um eine Stufe entspricht etwa einer Verdopplung der Wärmetransportkapazität der Wärmeleitung.

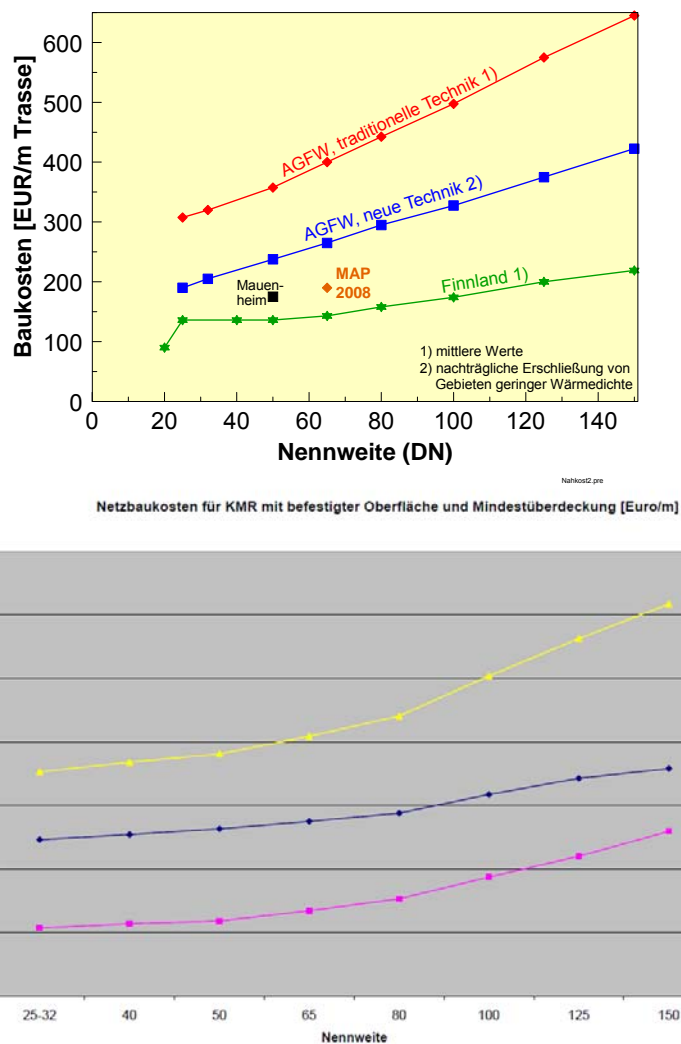


rechnet werden. Im Mittel über alle deutschen Wärmenetze liegt dieser Wert bei 4.000 kWh/m,a und speziell in städtischen Gebieten noch etwas darüber <sup>3</sup>.

Zur Parametrisierung der Baukosten wird vor diesem Hintergrund ein Potenzansatz gewählt, um die deutlich höheren Verlegekosten von Wärmeleitungen in verdichteten Siedlungsstrukturen im Gegensatz zu weniger verdichteten Strukturen abzubilden, der in nachfolgender Form umgesetzt ist:

$$\text{Baukosten [€/m]} = 180 \text{ €/m} \cdot (q_{\text{Trasse}} / 600 \text{ kWh/m,a})^a$$

Als Ausgangswerte finden die Kosten und der Wärmeabsatz des Bioenergiedorfes Mauenheim Verwendung.



**Abbildung 3-15: Baukosten von Wärmeleitungen.** Grundsätzlich ist zu sehen, dass die Baukosten mit der Nennweite steigen, wobei mitunter große regionale / nationale Unterschiede in den Kosten pro Meter Trasse anzusetzen sind. Zudem sind die Kosten eine Funktion der verwendeten Technik.

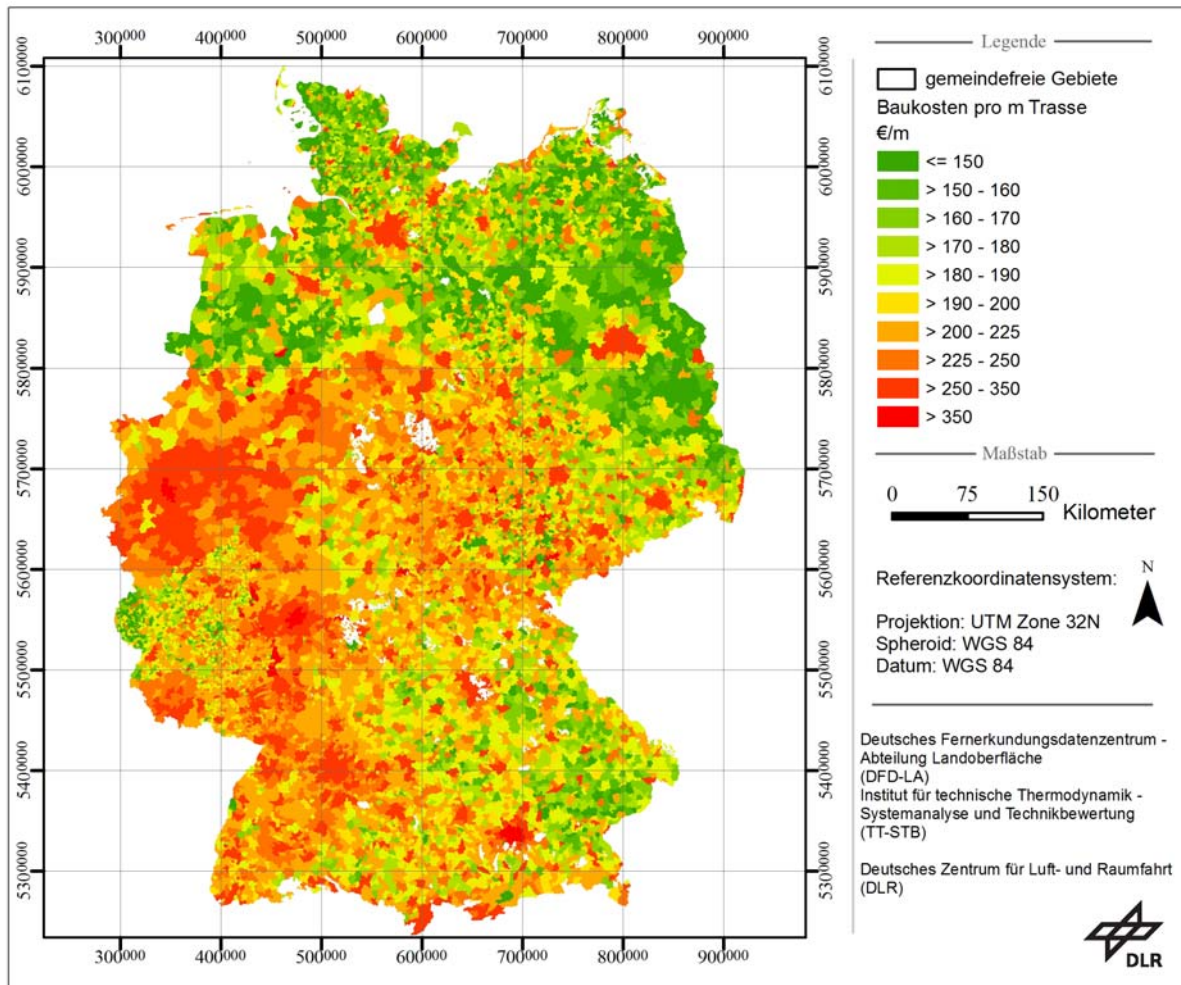
<sup>3</sup> In den in Dänemark sehr verbreiteten Wärmenetzen, mit welchem häufig auch der ländliche Raum erschlossen wird, liegt dieser Mittelwert bei nur 1.000 kWh/m,a.

Zur Bestimmung des freien Parameters  $a$  werden die Baukosten für ein städtisches Gebiet bei einer Nennweite von DN 65 in Höhe von 420 €/m sowie ein zugehöriger (geschätzter) Wärmeabsatz von 5.000 kWh/m,a herangezogen. Damit ergibt sich  $a = 0,4$ . Somit können die spezifischen Baukosten von Wärmeleitungen wie folgt berechnet werden:

$$\text{Baukosten [€/m]} = 180 \text{ €/m} * (q_{\text{Trasse}} / 600 \text{ kWh/m,a})^{0,4}$$

Der im jeweiligen Versorgungsgebiet erreichbare Wärmeabsatz  $q_{\text{Trasse}}$  ist dabei abhängig vom vorhandenen Wärmbedarf.

Die auf Basis dieses Ansatzes ermittelten Baukosten der Wärmeverteilungsleitungen sind in Abbildung 3-16 auf Gemeindeebene dargestellt. Erwartungsgemäß ergeben sich in den Großstädten und Ballungsräumen deutlich höhere Baukosten als in den weniger dicht besiedelten Gebieten. Es ist allerdings zu erwarten, dass diese höheren Kosten durch die dort höheren Trassenbelegungen mehr als ausgeglichen werden. Angegeben sind die über das gesamte Gemeindegebiet gemittelten Kosten. Innerhalb der einzelnen Gemeinden wird es deutliche Streuungen bei den spezifischen Leitungskosten geben. In den Zentren der Gemeinden, wo die Wärmedichten am höchsten sind und wo meist auch bereits existierende Fernwärmeversorgungen lokalisiert sind, ist mit deutlich höheren Kosten als in der Grafik angegeben zu rechnen.



**Abbildung 3-16. Baukosten von Wärmeleitungen pro Trassenmeter.** Erwartungsgemäß ergeben sich in den Großstädten und Ballungsräumen deutlich höhere Baukosten als in den weniger dicht besiedelten Gebieten. Allerdings sollten diese höheren Kosten durch die in urbanen Regionen höheren Trassenbelegungen mehr als ausgeglichen werden.

### 3.4.4 Hausübergabestationen und konventionelle Wärmebereitstellung

Neben der Berechnung der Hauptverteilungs- und Anschlussleitungen bzw. den damit verbundenen Kosten werden in die Analysen als weitere infrastrukturelle Komponenten die Aufwendungen für Hausübergabestationen und eine konventionelle Wärmeversorgung (Heizkessel) integriert.

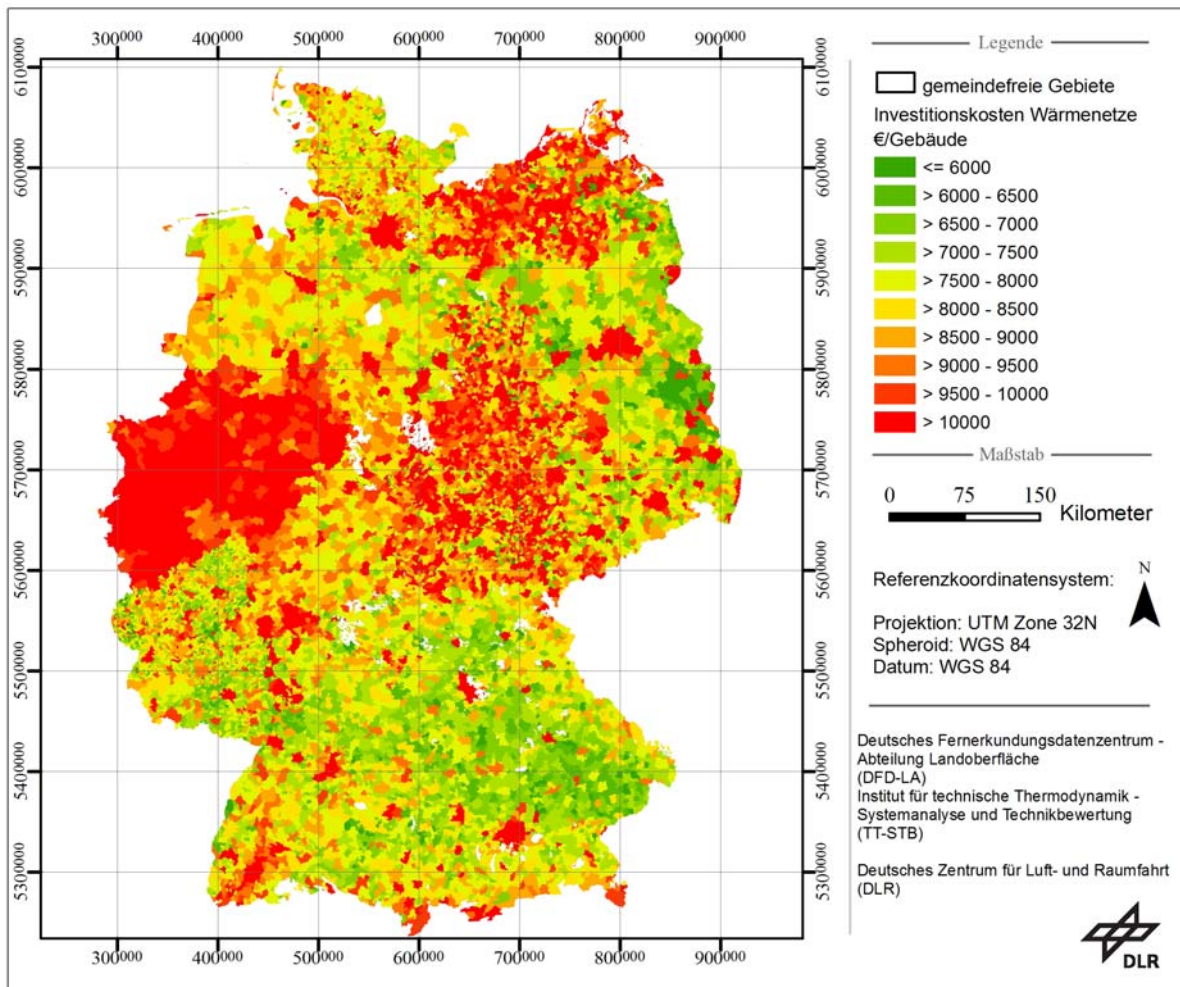
Für die Berechnung der Hausübergabestationen wird ein Top-down Ansatz gewählt, der die regionale Siedlungsstruktur und die damit verknüpfte Dimensionierung der Übergabestationen berücksichtigt. Für Dorf- und Stadtrandgebiete werden pro Gebäude 2602 €, für Bebauungen mittlerer Dichte 4163 € pro Gebäude, für dichte und sehr dichte Bebauungen 4290 € pro Gebäude und für Industrie und Gewerbeflächen 4400 € pro Gebäude veranschlagt (Fischedick et al., 2007).

Unter Kosten einer konventionellen Wärmebereitstellung werden im Rahmen der Studie Kosten verstanden, die zur Bereitstellung eines konventionellen Heizkessels für Öl oder Gas aufgewendet werden müssen. Da die Analysen zum Wärmenetzpotenzial primär in einem bereits wärmeversorgten Gebäudebestand durchgeführt werden, sind die Restwerte der bestehenden Heizkessel zum Zeitpunkt des Anschlusses mit einem Faktor von 0,5 (Schätzwert) versehen. Dieser Wert repräsentiert eine idealtypische Kennzahl und impliziert, dass die bestehenden Heizkessel für Öl und Gas die Hälfte ihrer technischen Lebensdauer erreicht haben. Auf Basis dieser Annahmen werden die in Tabelle 3-4 ausgewiesenen Kosten pro Gebäude, differenziert in Abhängigkeit des Gebäudetyps und entsprechender Nutzungskomponenten, verwendet. Analog zur Berechnung der Hausübergabestationen bedingt die abgebildete idealtypische Nutzungskomponente eine entsprechende Berechnung der Heizkessel pro Gebäude, deren Dimensionierung für Nichtwohngebäude größer ist als für Wohngebäude.

**Tabelle 3-4: Konventionelle Investitionskosten (Heizkessel für Öl / Gas) in Abhängigkeit des Gebäudetyps.**

| <b>Gebäudetyp</b> | <b>Investitionskosten pro Gebäude [€]</b> | <b>Angenommene Restwerte bei Anschluss an ein Wärmenetz [€]</b> |
|-------------------|---|---|
| EFH/ZFH           | 6207                                      | 3104  |
| KMH               | 8966                                      | 4483  |
| GMH               | 10642                                     | 5324  |
| Kleine NWG        | 11500                                     | 5750  |
| Mittlere NWG      | 19500                                     | 9750  |
| Große NWG         | 34500                                     | 17250   |

Auf Basis der erhobenen Informationen werden die Kosten für Nahwärmeleitungen mit den Kosten für Hausübergabestationen addiert und die veranschlagten Aufwendungen einer konventionellen Wärmebereitstellung subtrahiert. Die auf diese Weise berechneten Investitionskosten pro Gebäude sind in Abbildung 3-17 visualisiert.



**Abbildung 3-17: Investitionskosten pro Gebäude.** Zur Berechnung werden die Kosten für Nahwärmeleitungen mit den Kosten für Hausübergabestationen addiert und die veranschlagten Ausgaben einer konventionellen Wärmebereitstellung subtrahiert.

Dabei sind Werte in großen Teilen Nordrhein-Westfalens, Sachsen-Anhalts, Thüringens und Mecklenburg-Vorpommerns vergleichsweise hoch. Dies liegt in einer Kombination von relativ langen Hauptverteilungs- und Anschlussleitungen (bedingt durch Anordnung der Gebäude sowie Anteil an EFH/ZFH) sowie hohem Anteil der Nichtwohngebäude an den entsprechenden Gemeinden begründet. Analog sind zusammenhängende Gebiete relativ niedriger Investitionskosten pro Gebäude in Bayern und Baden-Württemberg zu finden.

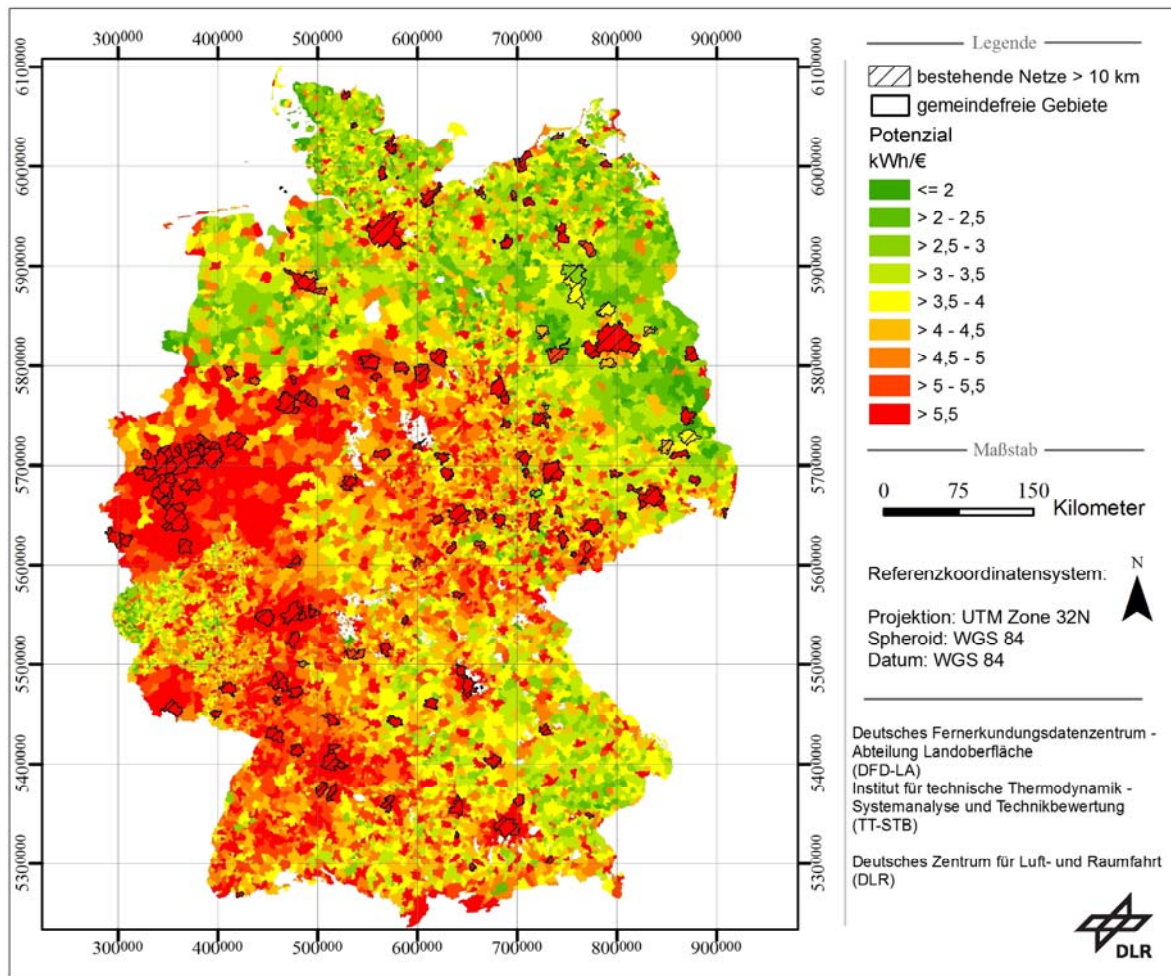
### 3.5 Bestimmung des Wärmenetzpotenzials

Für die Bestimmung des Wärmenetzpotenzials wird der Wärmebedarf den infrastrukturellen Investitionskosten auf Gemeindeebene gegenübergestellt. Da bestehende leitungsgebundene Wärmeversorgungssysteme das Erschließungspotenzial für Nahwärme reduzieren bzw. keinen weiteren Ausbau zulassen, sind in der Potenzialkarte regionalisierte Informationen zur bestehenden Fernwärmeversorgung integriert. Dabei sind die Möglichkeiten einer ge-

meinde- oder kreisbezogenen Integration bestehender Nah- und Fernwärmeversorgungen aufgrund unzureichender bzw. lückenhafter Datenlage stark limitiert. Ein Ansatz von Fischedick et. al (2007) nimmt eine Regionalisierung auf Basis der Netzdaten des Hauptberichts der AGFW (2005) vor. Dieser Hauptbericht fasst die Angaben von Fernwärmeversorgungsunternehmen zusammen, die gemäß Schätzungen der AGFW rund 90 % der in Deutschland bereitgestellten Fernwärme liefern. Die Regionalisierung erfolgt unter der Prämisse, dass der Sitz des Unternehmens in derselben Gemeinde liegt, wie das versorgte Gebiet. Unsicherheiten hinsichtlich der Regionalisierung bestehen in diesem Zusammenhang vor allem hinsichtlich der von großen Energieversorgern bedienten Gemeinden, da das Versorgungsgebiet auf mehrere Gemeinden verteilt sein kann (im Gegensatz zu Stadtwerken). Einer besonderen Betrachtung unterliegen in diesem Zusammenhang Gemeinden, die ein Wärmenetz von mehr als 10 km Streckenlänge aufweisen, was eine entsprechende Minderung der theoretischen Nahwärmepotenziale für die entsprechenden Gemeinden induziert. Diese Gemeinden kommen für einen Ausbau von Nahwärme kaum in Betracht.

Abbildung 3-18 zeigt, dass sich die wirtschaftlichen Bedingungen für die Realisierung von Nahwärme in den verschiedenen Regionen Deutschlands stark unterscheiden. Die günstigsten Bedingungen finden sich vornehmlich in den Ballungszentren. Die bereits bestehenden großen Fernwärmenetze sind ausnahmslos in den Gemeinden lokalisiert, in denen auch gemäß der vorliegenden Auswertung die günstigsten Randbedingungen anzutreffen sind. Es gibt aber auch große Gebiete, in denen trotz günstiger wirtschaftlicher Randbedingungen noch keine größeren Fernwärmenetze realisiert wurden. Dies ist z.B. im Bergischen Land zwischen Siegen und Bonn der Fall. Zu den günstig bewerteten Gebieten gehört auch eine Reihe von Gemeinden am Alpenrand. Hier macht sich der besonders hohe Heizwärmebedarf bemerkbar, welcher aus den dort herrschenden kalten Wintern folgt. Gerade in den Gemeinden, in denen es günstige wirtschaftliche Randbedingungen, aber bisher keine großen Fernwärmenetze gibt, ist ein überdurchschnittliches Potenzial für die Nutzung von Nahwärme aus erneuerbaren Energien zu erwarten. Dies liegt insbesondere darin begründet, dass dort noch größere landwirtschaftliche Flächen und Wald zur Bereitstellung von energetisch nutzbarer Biomasse vorhanden sind. Auch für die Bereitstellung von kostengünstiger solarer Nahwärme aus Kollektorfeldern, welche auf Freiflächen installiert werden, dürften hier günstigere Bedingungen herrschen als in den bestehenden Fernwärmegebieten.



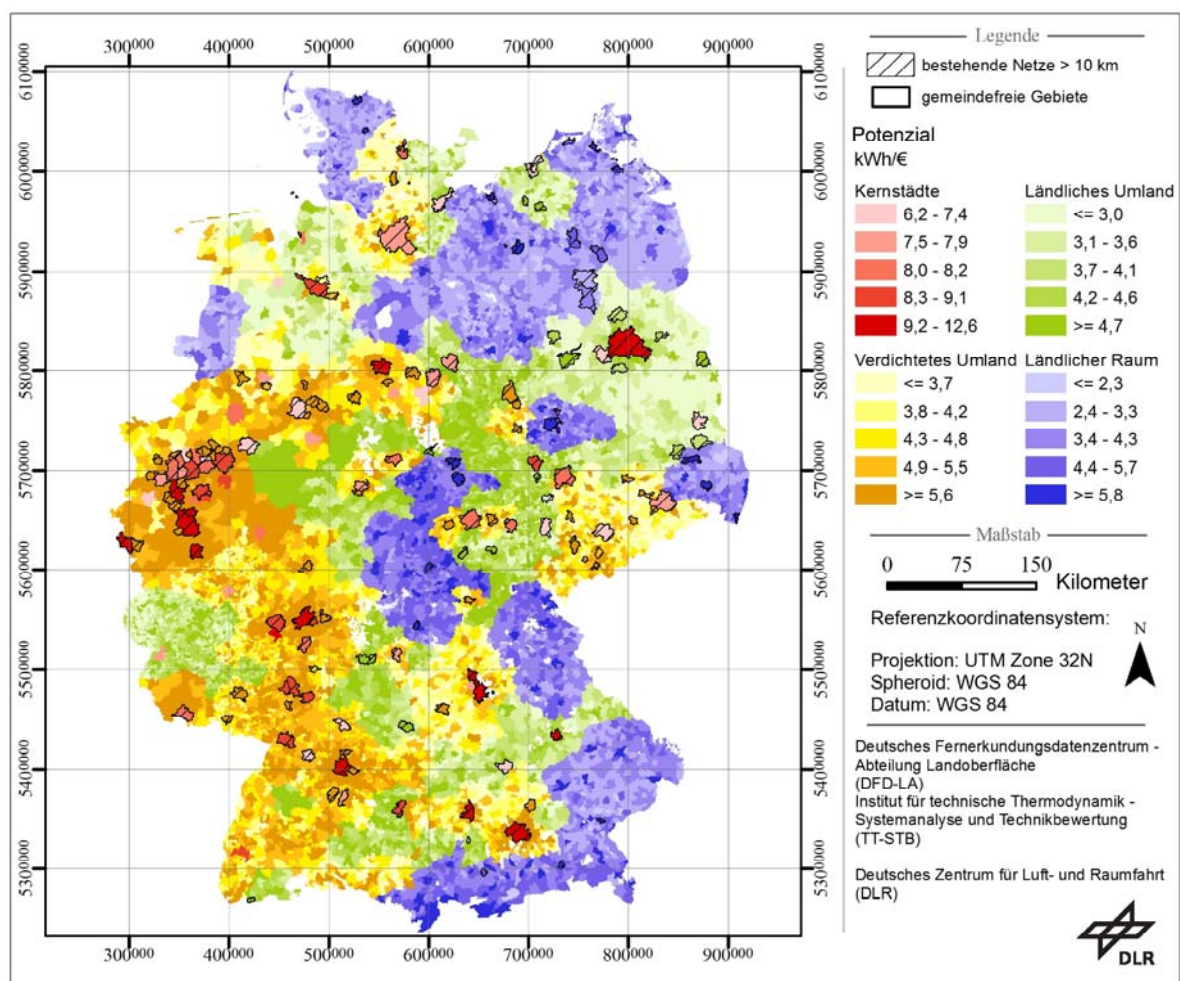


**Abbildung 3-18: Ermitteltes Wärmenetzpotenzial der Gemeinden in Deutschland.** Die günstigsten Bedingungen finden sich vornehmlich in den Ballungszentren sowie im Westen und Süden. Die bereits bestehenden großen Fernwärmenetze sind ausnahmslos in den Gemeinden lokalisiert, in denen auch gemäß der vorliegenden Auswertung die günstigsten Randbedingungen anzutreffen sind. Es gibt aber auch weite Gebiete, in denen trotz günstiger Randbedingungen noch kein Fernwärmenetz realisiert wurde.

In Abbildung 3-19 ist das technische Wärmenetzpotenzial - nach unterschiedlichen siedlungsstrukturellen Kreistypen differenziert - dargestellt. Die verwendeten Kreistypen basieren auf der vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) vorgenommenen Typisierung. Die Einteilung der Kreise erfolgt nach der Bevölkerungsdichte und Zentralitätskriterien (BBSR, 2011) und wird für die folgende Darstellung in Kernstädte, verdichtetes Umland, ländliches Umland und ländliche Räume zusammengefasst. Die Einteilung der jeweiligen Potenzialwerte erfolgt auf Basis der typspezifischen Quantilsbereiche des Wertespektrums, um charakteristische Wertebereiche der unterschiedlichen Raumtypen zu bilden und eine relative Eignung und Priorisierung innerhalb eines Typs darzustellen. Analog zu den bereits dargelegten Ergebnissen weisen Kernstädte die höchsten Werte auf, bei einer stetigen Minderung des Niveaus der Potenzialwerte von Gemeinden im verdichteten Umland zu Gemeinden im ländlichen Raum. Mit Blick auf die Integration und Bewertung von Potenzialen erneuerbarer Energien ließen sich potentiell Gemeinden identifizieren, die eine vorteilhafte

Siedlungsstruktur aufweisen, mit möglichen Anbauflächen für Biomasse oder Freiflächen für Solaranlagen.

Zu sehen ist darüber hinaus, dass gerade in den NBL, wo ein relativ hoher Anteil der Wohnungen mit Fernwärme beheizt wird, die wirtschaftlichen Randbedingungen für Wärmenetze eher ungünstig sind. Dabei sind demographische Faktoren wie etwa die für die NBL prognostizierte Bevölkerungsabnahme noch nicht integriert. Auch im Norden Deutschlands sind die wirtschaftlich-strukturellen Randbedingungen eher ungünstig. Es bleibt jedoch zu klären, warum dennoch nördlich der Grenze zu Dänemark große Teile des Wärmebedarfs aus Nahwärme gedeckt werden, obwohl sich vermutlich an den strukturellen Randbedingungen beim Übergang von Deutschland nach Dänemark nur wenig ändert.



**Abbildung 3-19: Wärmenetzpotenzial kategorisiert für die siedlungsstrukturellen Kreistypen des BBSR.** Die siedlungsstrukturellen Kreistypen werden nach Bevölkerungsdichte und Zentralitätskriterien definiert und sind in dieser Darstellung in Kernstädte, verdichtetes Umland, ländliches Umland und ländliche Räume zusammengefasst.

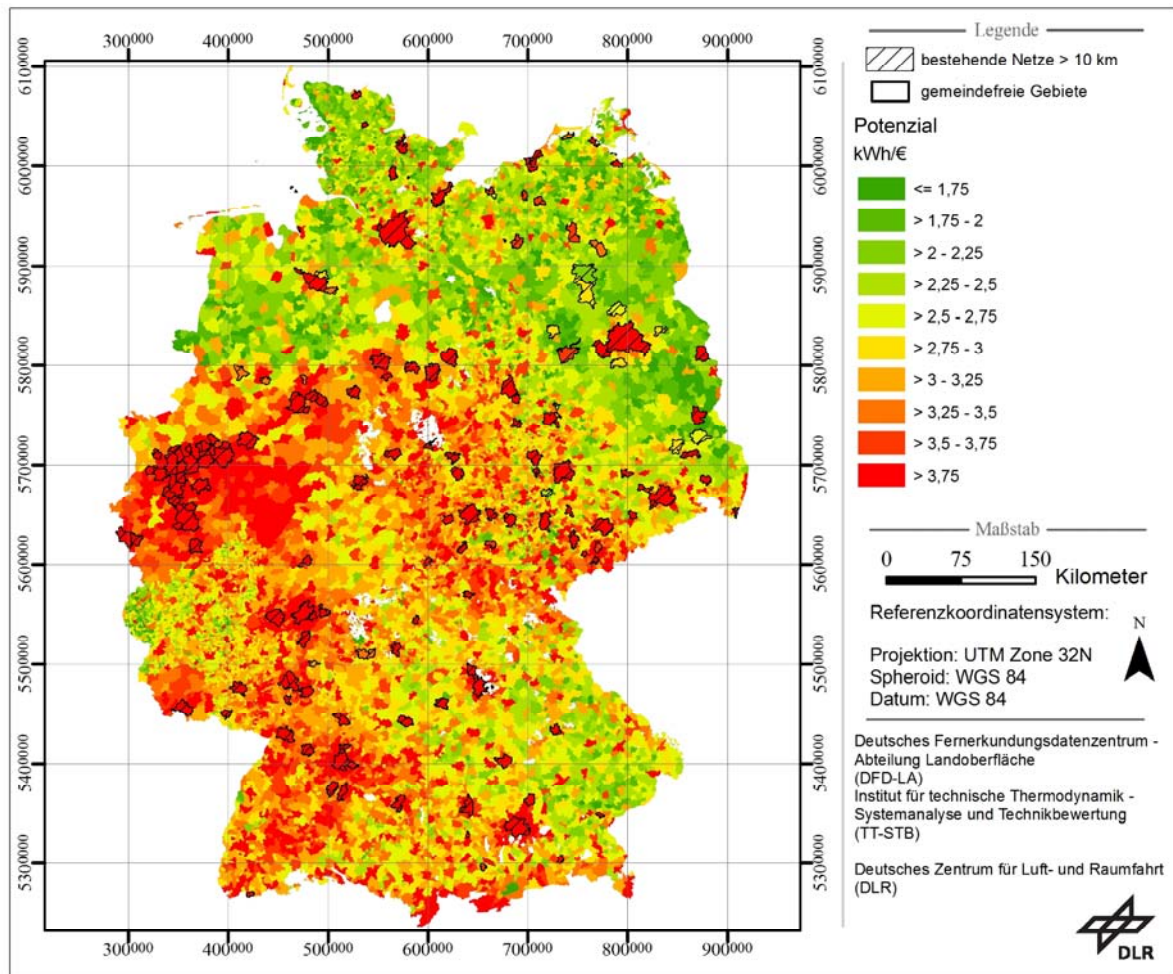
Im günstigen Fall kann je investiertem Euro ein jährliches Absatzpotenzial von 5 kWh oder mehr für Wärmenetze erschlossen werden. In den ungünstiger strukturierten Gemeinden



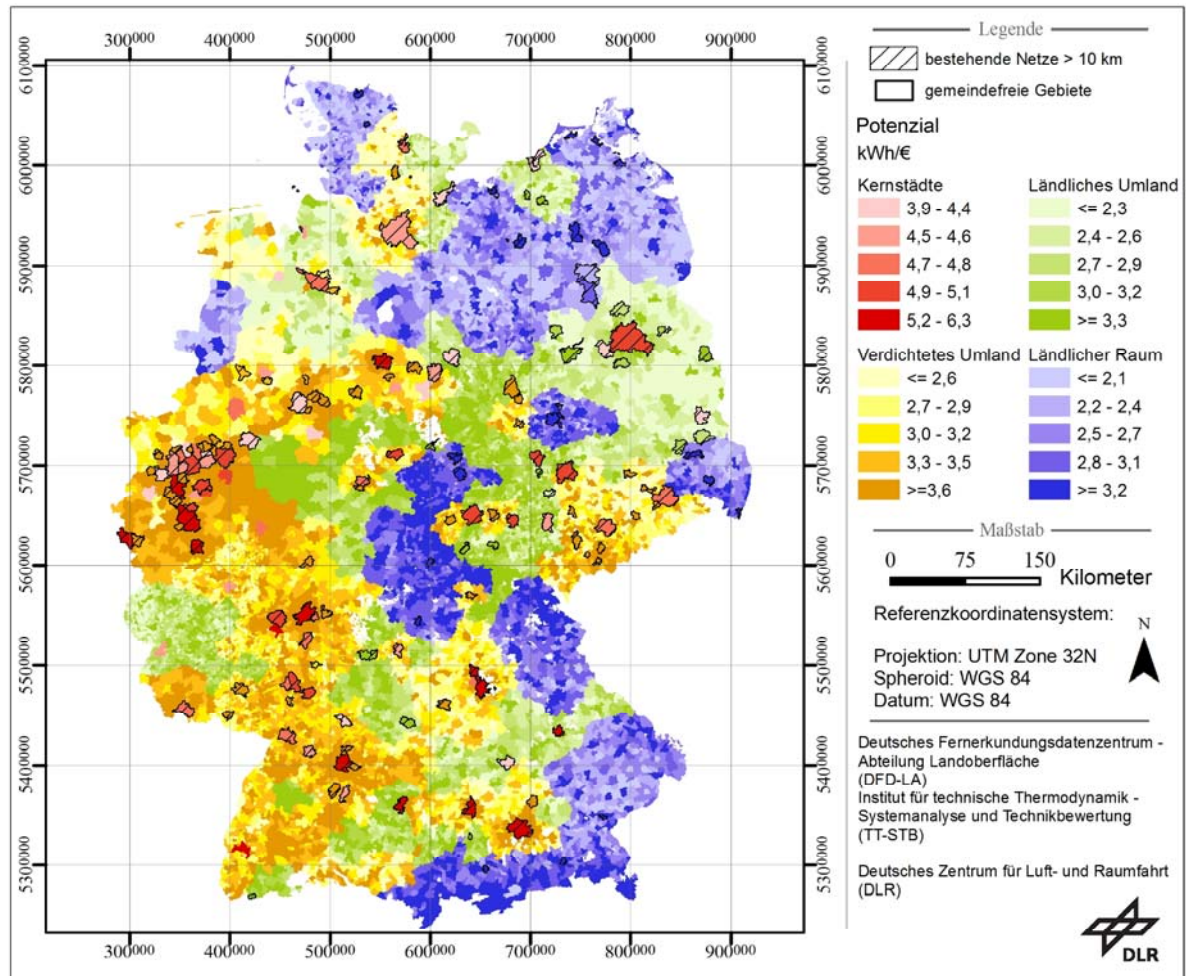
sinkt dieser Wert auf 2,5 kWh. Dementsprechend erfordert die Erschließung eines Gemeindegebietes für die Fern- oder Nahwärme Investitionen zwischen 0,2 und 0,4 €/kWh/a). In diesen Investitionen sind nur das Wärmenetz selbst und die Hausübergabestationen enthalten. Um zu einem vollständigen, umweltfreundlichen Versorgungssystem zu kommen, müssen noch die Investitionen für eine Heizzentrale auf der Basis von erneuerbaren Energien oder von KWK hinzugerechnet werden. Im Rahmen einer solchen Umsetzung ließen sich fossile Brennstoffe wie Öl oder Gas in großen Mengen ersetzen. Um die Investitionskosten in Relation zu anderen Kosten im Wärmemarkt setzen zu können, wird folgende überschlägige Berechnung angewendet: Bei einem über 30 Jahre gemittelten Preis für fossile Brennstoffe von 0,10 €/kWh (entsprechend einem Ölpreis von etwa 1 €/l oder einem Gaspreis von 1 €/m³) können durch ein vollständig regenerativ betriebenes Wärmenetz im Laufe seiner Lebensdauer von 30 Jahren fossile Brennstoffe im Wert von 3 €/kWh/a) eingespart werden (bezogen auf die im Netz jährlich abgesetzte Wärmemenge). Die Differenz zu den oben angegebenen Investitionskosten für das Wärmenetz, also zwischen 2,6 und 2,8 €/kWh/a), stünde zur Finanzierung einer Investition in eine umweltfreundliche Heizzentrale zur Verfügung.

Ein weiterer nützlicher Wert, der sich aus den hier dargestellten Investitionskosten für das Netz ergibt, sind die Wärmeverteilungskosten. Bei einem Zinssatz von 6 %, Wartungskosten von jährlich 1 % und einer Abschreibungsdauer über die Lebenszeit (30 a) ergibt sich ein auf die Investition bezogener Fixkostenfaktor von 0,0826 und damit auf den Wärmeabsatz bezogene Wärmeverteilungskosten zwischen 1,7 und 3,3 ct/kWh (zzgl. Aufwendungen für Pumpstrom und Aufwendungen für die Deckung von Netzverlusten).

Ohne die Integration der Kosten einer konventionellen Wärmebereitstellung, die in den bisherigen Potenzialdarstellungen von den wärmenetzbezogenen Investitionskosten subtrahiert wurden, ergeben sich besonders hinsichtlich der quantitativen Potenzialwerte deutliche Unterschiede (Abb. 3-20 und 3-21). Allgemein ist eine Verminderung des Niveaus der absoluten Potenzialwerte die Folge, die nur in sehr günstigen Fällen ein jährliches Absatzpotenzial von 3,5 kWh je investiertem Euro oder mehr aufweisen. Des Weiteren impliziert dieses Vorgehen eine Aufwertung von Gemeinden, deren Gebäudeinventar besonders von EFH/ZFH dominiert wird und wo zugleich ein entsprechend geringer Anteil an mittleren und großen NWG vorhanden ist, da die angenommenen Kosten einer konventionellen Wärmebereitstellung besonders für mittlere und große NWG deutlich höher sind als die Kosten einer Hausübergabestation im Vergleich zum entsprechenden Kostenpaar (Hausübergabestation und Heizkessel) der EFH/ZFH (vgl. Abschnitt 3.4.4).



**Abbildung 3-20: Ermittelter Wärmenetzpotenzial der Gemeinden in Deutschland ohne Berücksichtigung der Kosten einer konventionellen Wärmebereitstellung.** Allgemein ist eine Verminderung des Niveaus der absoluten Potenzialwerte festzustellen. Gemeinden mit sehr günstigen Werten erreichen nun ein Absatzpotenzial von 3,5 kWh je investiertem Euro oder mehr. Zudem werden Gemeinden aufgewertet, deren Gebäudeinventar besonders von EFH/ZFH dominiert wird und gleichzeitig ein entsprechend geringer Anteil an mittleren und großen NWG vorhanden ist.



**Abbildung 3-21: Wärmenetzpotenzial kategorisiert für die siedlungsstrukturellen Kreistypen des BBSR ohne Berücksichtigung der Kosten einer konventionellen Wärmebereitstellung.** Analog zu Abbildung 3-20 ist eine Verminderung des Niveaus der absoluten Potenzialwerte für die unterschiedlichen Kreistypen die Folge.

## 4 Energiebezogene Analysen auf Quartiersebene

Die Erdbeobachtung - ob vom Satelliten oder vom Flugzeug aus - bietet aktuelle, unabhängige, raumbezogene, flächendeckende und vergleichsweise kostengünstige Daten zur Erfassung von Objekten und Strukturen auf der Erdoberfläche. Die Grundvoraussetzungen für eine Analyse des Wärmenetzpotenzials, wie sie in Kapitel 3 vorgestellt wurden, sind damit nicht nur gegeben, sondern die Vielzahl unterschiedlicher Erdbeobachtungsdaten ermöglicht darüber hinaus eine thematisch und geometrisch breit gefächerte Bearbeitung energierelevanter Fragestellungen.

Neben einer räumlich höher aufgelösten Berechnung des Wärmenetzpotenzials (Abschnitt 4.2.5) werden im folgenden Kapitel auch die Möglichkeiten der Erdbeobachtung hinsichtlich der Inventarisierung von Solarflächen und begrünten Dächern, der Analyse des Photovoltaikpotenzials, der Modellierung des städtischen Mikroklimas sowie der Ableitung siedlungsstrukturbezogener Parameter wie Bebauungsgrad, Bauvolumen oder Grünanteil, vorgestellt. Die im Folgenden beschriebenen Arbeiten auf Quartiersebene haben dabei zum Ziel, die Eignung von Erdbeobachtungsdaten und -methoden für eine detaillierte Standortanalyse zum Aufbau von Wärmenetzen und der Ableitung weiterer energie- bzw. klimarelevanter Parameter aufzuzeigen.

Die Quartiersstudie wird exemplarisch für einen Ausschnitt der Münchner Stadtlandschaft durchgeführt. Abbildung 4-1 bietet eine geographische Einordnung anhand der administrativen Stadtviertelgrenzen und zeigt die Baublöcke, vorgegeben aus dem Straßen- und Schienennetz. Die Baublöcke dienen im Verlauf der Untersuchungen u.a. als räumliche Referenzeinheit.

Das Beispielsquartier bildet einen strukturell heterogenen Raum ab - mit typischer innerstädtischer Blockrandbebauung in der Isarvorstadt und in Au-Haidhausen bis hin zu Einzel- und Doppelhausbebauung in periphereren Lagen der Viertel Berg am Laim und Ramersdorf-Perlach.

### 4.1 Datengrundlagen

Die Erdbeobachtung bietet eine Vielzahl an Datensätzen verschiedenster Aufnahmeplattformen und Sensoren, um raumbezogene Fragestellungen zu bearbeiten. Taubenböck & Roth (2010) geben einen Überblick über passive und aktive Erdbeobachtungssysteme, die sich insbesondere für die Erfassung der Kleinräumigkeit urbaner Landschaften eignen.

Um die verschiedenen Daten von satelliten- und flugzeuggetragenen Erdbeobachtungssensoren nutzbar zu machen, müssen Vorprozessierungsschritte zur Aufbereitung der Original-

daten vorgenommen werden. Beispielsweise ist eine Geokodierung durchzuführen, um unterschiedliche Informationen aus verschiedenen Datenquellen in einer integrativen Analyse auswerten zu können. Hierfür werden die Daten an ein einheitliches Referenzsystem angeglichen. In der optischen Fernerkundung spielen zudem die Einflüsse der Atmosphäre eine bedeutende und komplexe Rolle. Die am Sensor ankommende und dort aufgezeichnete elektromagnetische Strahlung entspricht nach Menge und spektraler Zusammensetzung aufgrund von atmosphärischen Wechselwirkungen nicht der von den Objekten auf der Erdoberfläche reflektierten oder emittierten Strahlung. Dementsprechend werden die verwendeten Datensätze mit einem physikalischen Modell (ATCOR) korrigiert, um die atmosphärischen Effekte zu beseitigen und dadurch die tatsächlichen physischen Reflexionswerte der Erdoberfläche zu erhalten. Die im Rahmen dieser Studie eingesetzten (Fernerkundungs-)Datensätze werden im Folgenden kurz vorgestellt.



**Abbildung 4-1: Lage und Charakteristik des Untersuchungsgebiets für die Quartiersstudien im Gebiet um den Münchner Ostbahnhof.**

#### *Straßendatensatz*

Zur Abgrenzung von Baublöcken finden im Rahmen der quartiersbezogenen Auswertungen wiederum die ATKIS-Daten zum Verkehrswegenetz Verwendung. Da dieser bereits in Kapitel 3.2 beschrieben wurde, sei an dieser Stelle auf das entsprechende Kapitel verwiesen.

#### *Ikonos – Multispektrale optische Satellitendaten*

Der im September 1999 gestartete, kommerziell ausgerichtete Ikonos-Satellit wird von der Firma GeoEye (USA) betrieben (GeoEye, 2010). Auf seiner sonnensynchronen polaren Umlaufbahn in ca. 680 km Höhe kann der Satellit bei etwa 14 Erdumrundungen maximal 900 Aufnahmen am Tag liefern. Jede dieser Szenen bildet eine Fläche von bis zu 11\*11 km ab. Das multispektrale Aufnahmesystem verfügt über vier monochromatische Spektralbänder - Blau, Grün, Rot und Nahes Infrarot - mit einer Bodenauflösung von 4\*4 m. Darüber hinaus



gibt es einen panchromatischen Aufnahmekanal mit einer Bodenauflösung von 1\*1 m. Der Datenvertrieb in Europa wird von dem Tochterunternehmen European Space Imaging (EUSI) mit Sitz in München übernommen (EUSI, 2010). Tabelle 4-1 zeigt die Lage der Aufnahmebänder im elektromagnetischen Spektrum und die Pixelgrößen der jeweiligen Aufnahmekanäle des Ikonos-Systems.

**Tabelle 4-1: Technische Daten des Ikonos-Systems (Quelle: EUSI, 2010).**

| <b>Ikonos</b>                     |                       |                        |
|-----------------------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>Technische Parameter</b>       | <b>Panchromatisch</b> | <b>Monochromatisch</b> |
| Spektrale Auflösung [nm]          | 525 - 928             | blau: 444 - 516        |
|                                   |                       | grün: 506 - 595        |
|                                   |                       | rot: 631 - 697         |
|                                   |                       | NIR: 757 - 852         |
| Geometrische Auflösung [m]        | 1                     | 4                      |
| Breite des Aufnahmestreifens [km] | 11                    |                        |
| Repetitionsrate [Tage]            | 140                   |                        |

Die geometrische Auflösung dieses Sensors ermöglicht es, die kleinräumigen Strukturen und heterogenen Objekte urbaner Landschaften zu erfassen. Wie in der Einleitung von Kapitel 4 erwähnt, bietet der Ausschnitt um den Münchner Ostbahnhof (Abbildung 4-2) ein breites siedlungsstrukturelles Spektrum - beispielsweise sind Blockrandbebauungen in Zentrumsnähe, Gewerbegebiete südlich des Ostbahnhofes oder Einzelhausbebauungen im Südosten zu finden. Mit Ikonos vergleichbare Erdbeobachtungssysteme stehen mit den Sensoren QuickBird, GeoEye, WorldView I & II sowie Cartosat zur Verfügung.

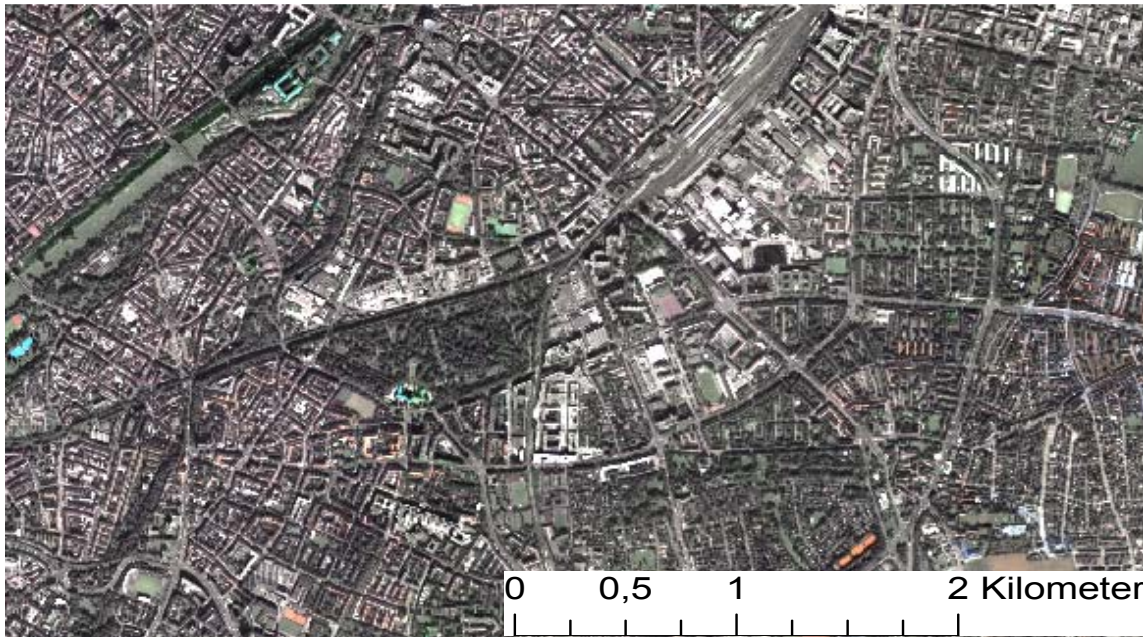
#### *Daedalus – Ein multispektraler flugzeuggetragener Sensor*

Daedalus ist ein flugzeuggetragener Multispektralsensor (Amann, 1986). Er hat neun spektrale Kanäle im sichtbaren Licht und nahen Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums. In der vorliegenden Studie werden für die Ableitung von Oberflächentemperaturen zwei Thermalkanäle eingesetzt, die zwischen 8 und 13  $\mu\text{m}$  liegen.

#### *HyMap – Hyperspektrale Erdbeobachtungsdaten*

HyMap ist ein flugzeuggetragener Sensor (Cocks et al., 1998), der in 125 spektralen Kanälen Daten aufzeichnet. Da dies weit mehr ist als die Anzahl spektraler Kanäle herkömmlicher Luftbilder (meist drei bis vier), werden solche Daten als „Hyperspektraldaten“ bezeichnet. Diese hohe spektrale Auflösung ermöglicht es, das elektromagnetische Spektrum im Wellenlängenbereich von 500 nm bis 2500 nm annähernd stetig abzubilden. Da jedes Material (z.B. Boden, Dachziegel, Beton) eine eigene, charakteristische spektrale Signatur - d.h. Verlauf der Reflexion über die vielen verschiedenen spektralen Kanäle hinweg - aufweist, lassen

sich die verschiedenen Oberflächenmaterialien mit automatischen Verfahren objektiv identifizieren. Abbildung 4-3 zeigt das Untersuchungsgebiet der Quartiersstudie in einer Falschfarbendarstellung von HyMap Daten. Die räumliche Auflösung der HyMap-Aufnahmen ist abhängig von der Flughöhe. Für den hier verwendeten Datensatz, aufgenommen am 17. und 26. Juni 2007, beträgt die Abdeckung eines Pixels 4 m, was die Identifikation individueller urbaner Objekte, wie etwa Gebäude oder Bäume, ermöglicht.



**Abbildung 4-2:** Ausschnitt einer Ikonos-Aufnahme vom Untersuchungsgebiet um den Ostbahnhof in München.

#### *HRSC – High Resolution Stereo Camera*

Für eine adäquate Erfassung der physischen Merkmale des Siedlungskörpers, der Bautypologien und der strukturellen Besonderheiten ist die vertikale Komponente der urbanen Objekte von entscheidender Bedeutung (Wurm & Taubenböck, 2010). Um diese detailliert und flächenhaft zu erfassen, sind digitale Oberflächenmodelle (DOM) geeignet, die vornehmlich aus Airborne Laserscanning Daten (ALS) oder über photogrammetrische Verfahren aus Luftbildern gewonnen werden (Wurm et al., 2011; Kraus, 2004).

Für die Quartiersstudie stehen diesbezüglich Aufnahmen einer flugzeuggetragenen Stereokamera, der High Resolution Stereo Camera (HRSC), zur Verfügung (Lehmann et al., 2000). Die Stereokamera HRSC ist ein multispektraler Zeilenscanner für fernerkundliche und photogrammetrische Anwendungen. Ursprünglich wurde die HRSC für die russische Weltraummission Mars96 konzipiert und nach einem gescheiterten Missionsstart zu einem flugzeuggestützten Erdfernerkundungssensor modifiziert. Charakteristisches technisches Merkmal des Kamerasystems sind mehrere, parallel in der Fokalebene angeordnete CCD-Zeilen (Charged Coupled Device). Die HRSC arbeitet nach dem sogenannten „Pushbroom-Prinzip“,

d.h. die Bilddimensionen werden durch die Länge der CCD-Zeile und die Flugbewegung definiert. Der panchromatische Nadir-Kanal ist (per Definition) senkrecht zur Bildebene ausgerichtet, die beiden stereoskopischen Kanäle haben einen Blickwinkel von  $20,5^\circ$  relativ zum Nadir. Nach der Generierung der eigentlichen Bildstreifen und der radiometrischen und geometrischen Korrektur erfolgt die Ableitung eines DOM über die Identifizierung homologer Bildpunkte anhand einer flächenhaften Grauwert-Korrelation. Hierfür wird der Nadir-Kanal als Referenzbild definiert, die anderen Stereokanäle werden diesem Referenzbild gleichwertig zugeordnet. Die Zuweisung wird auf Basis eines hierarchischen Pyramidenverfahrens vorgenommen (Mayer, 2003). Die eingesetzte Kamera verfügt über eine mittlere geometrische Genauigkeit von etwa 20 cm, die Höhengengenauigkeit liegt bei circa 25 cm. Besonders unstetige Objektkanten im Gelände können bei der Datenverarbeitung photogrammetrische Fehlzugeordnungen („Matching-Fehler“) und damit größere Abweichungen induzieren (DLR, 2009).



**Abbildung 4-3: HyMap-Aufnahme vom Untersuchungsgebiet um den Münchner Ostbahnhof in Falschfarben-Darstellung (rot: 1652 nm, grün: 752 nm, blau: 543 nm).**

Auf Basis der in den HRSC-Daten beinhalteten Objekthöhen wird die modellhafte Abbildung der dritten Dimension der urbanen Morphologie abgeleitet. Um aus den Bilddaten ein dreidimensionales Gebäudemodell zu erstellen, sind verschiedene Verfahrensschritte notwendig, die im folgenden Abschnitt eingehender erörtert werden.





**Abbildung 4-4: Digitales Oberflächenmodell basierend auf Daten der HRSC Kamera.** Aufgrund ihrer - relativ gesehen - größeren Höhe gegenüber ihrer Umgebung treten Häuser, aber auch Bäume, als vergleichbar helle Strukturen in Erscheinung. Gut zu erkennen ist im westlichen Ausschnitt auch der Anstieg in der Topographie vom Bereich der Isarauen zum Isarhochufer.

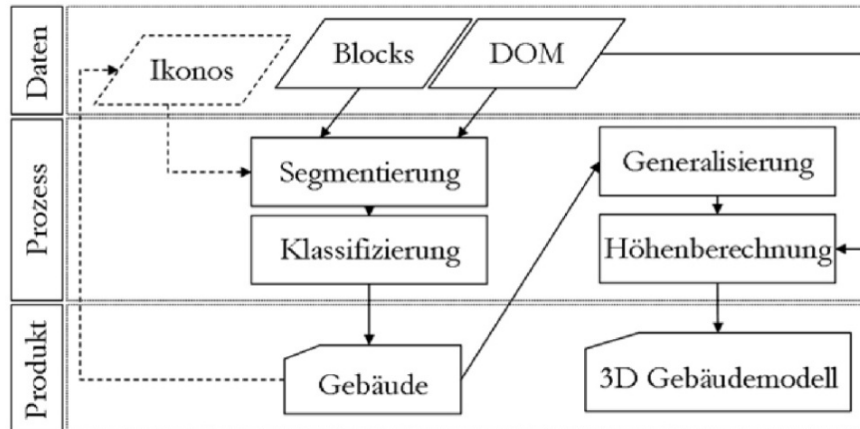
## 4.2 Fallstudien

### 4.2.1 Charakterisierung der Stadtstruktur

Erdberechnungsdaten sind Daten und noch keine Information. In den letzten Jahren haben sich objektorientierte Verfahren für die Datenauswertung in kleinräumig strukturierten Bereichen - insbesondere für Analysen städtischer Strukturen - etabliert (Blaschke, 2010). Dadurch wird es möglich, neben spektralen Eigenschaften auch räumliche, hierarchische oder kontextbezogene Merkmale zur Klassifikation der Bildinhalte heranzuziehen. Als Basis für die in diesem Kapitel näher beschriebenen Fallstudien wird dabei über eine objektorientierte Bildanalyse zunächst ein Satz an Basisinformation abgeleitet. Dieser umfasst einen Gebäude-layer mit zugehöriger Gebäudehöhe sowie die Art der Landbedeckung.

In Abbildung 4-5 ist der modularisierte Ablauf der Gebäudeextraktion aus Höhendaten (Digitales Oberflächenmodell – DOM) dargestellt, wie er in die Softwareumgebung von eCognition implementiert ist. Darüber hinaus sind die verwendeten Datenquellen sowie die durchgeführten Prozesse dargestellt. Die Einbeziehung von optischen Daten ist optional, wenn sich allein auf Basis des digitalen Oberflächenmodells nicht die gewünschten Ergebnisse erzielen

lassen. Anschließend kann eine Generalisierung der extrahierten Gebäudeobjekte erfolgen, bevor der jeweilige Höhenwert auf Grundlage des DOM berechnet wird.



**Abbildung 4-5: Ablaufdiagramm der Gebäudeextraktion aus Fernerkundungsdaten.** Auf Basis von digitalem Oberflächenmodell (DOM), Satellitenbilddatensatz (Ikonos) und ATKIS Baublöcken (Blocks) werden einzelne Bebauungsstrukturen nach dem Ablauf von Bildsegmentierung und Bildklassifikation identifiziert und können ggf. eine Generalisierung unterlaufen, um eine repräsentative Visualisierung im Sinne eines 3D Gebäudemodells zu erhalten.

Das Verfahren basiert grundsätzlich auf zwei separaten Modulen: *Segmentierung* und *Klassifizierung*. Bei der Segmentierung werden benachbarte Pixel unter Berücksichtigung von Homogenitätskriterien zusammengefasst, um aussagekräftige Objekte (Segmente) zu generieren. Diese neuen Grundeinheiten repräsentieren im Idealfall Formen und Objekte der realen Welt, wodurch für eine Klassifizierung nicht nur spektrale, sondern auch form-, struktur-, kontext- und hierarchiebezogene Attribute herangezogen werden können.

In einem ersten Segmentierungsschritt wird unter Berücksichtigung des ATKIS-Baublocklayers eine übergeordnete Raumeinheit erzeugt, die „Baublücke“ repräsentiert. Diese teilen das Untersuchungsgebiet in strukturell ähnliche Bebauungsflächen.

Die Baublöcke dienen im Folgenden als Bezugseinheit, um statistische Kennwerte auf Basis des DOM zu berechnen. Zur Extraktion der Gebäude auf Basis ihrer Höhe werden zunächst für jeden Baublock die Extrema sowie unterschiedliche Quantile der Grauwerte des DOM berechnet. Quantile erweisen sich als stabil hinsichtlich von Grauwerten, die weit außerhalb des Streubereichs um den Erwartungswert liegen (Wurm et al., 2011).

Für jedes Baublock-Segment wird dann eine Segmentierung auf Basis der minimalen Werte und der maximalen Werte des jeweiligen Blocks durchgeführt, um helle (erhöhte) Objekte von dunklen (nicht-erhöhten) Objekten zu trennen. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass für jedes Objekt die lokal am besten angepassten Grenzwerte für die Segmentierung herangezogen werden. Die Segmente unterteilen das DOM im Idealfall in Parzellen, die Regionen gleicher Höhe repräsentieren und deren Kanten den Gebäudegrundrissen entsprechen.

Neben den Höheninformationen lassen sich auch formbasierte Objekteigenschaften für eine Zuweisung der Segmente zur Klasse „Gebäude“ nutzen. Auf Basis dieser Kriterien ist gewährleistet, dass gebäudetypische Merkmale verwendet werden, die einer geringen räumlichen und zeitlichen Variabilität unterliegen und somit eine hohe Übertragbarkeit auf andere Untersuchungsgebiete ermöglichen.

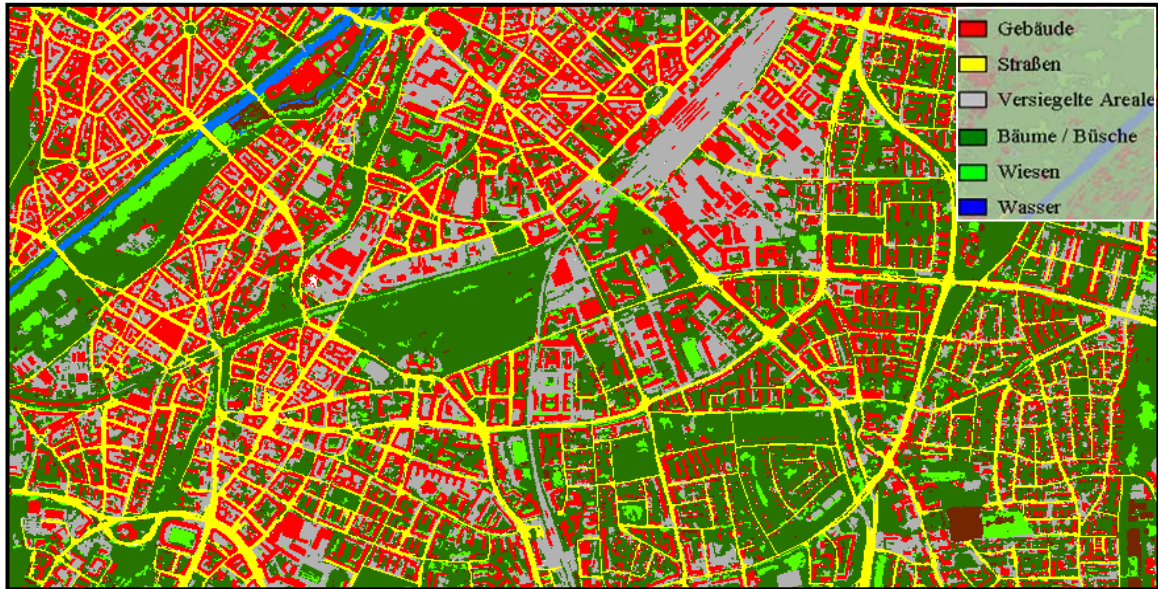
Die Klassifikation der Gebäude basiert auf einem Fuzzy-Logik Ansatz (Taubenböck, 2008). Die Ausprägung der ausgewählten Gebäudemerkmale „Höhendifferenz zu Nachbarobjekten“, „Kompaktheit“, „Verhältnis Länge zu Breite“ und „rechtwinklige Passform“ wird für jedes Segment in stetige Zugehörigkeitsfunktionen umgewandelt und für die Klassifikation verwendet (Wurm et al. 2011). Das Ergebnis der Gebäudeklassifikation ist in Abbildung 4-6 dargestellt.



**Abbildung 4-6: Ergebnis der Gebäudeextraktion (rot) aus Fernerkundungsdaten.** Die aus dem digitalen Oberflächenmodell klassifizierten Gebäudeflächen sind diesem in rot überlagert und geben einen visuellen Eindruck der kleinräumigen Gebäudestrukturen.

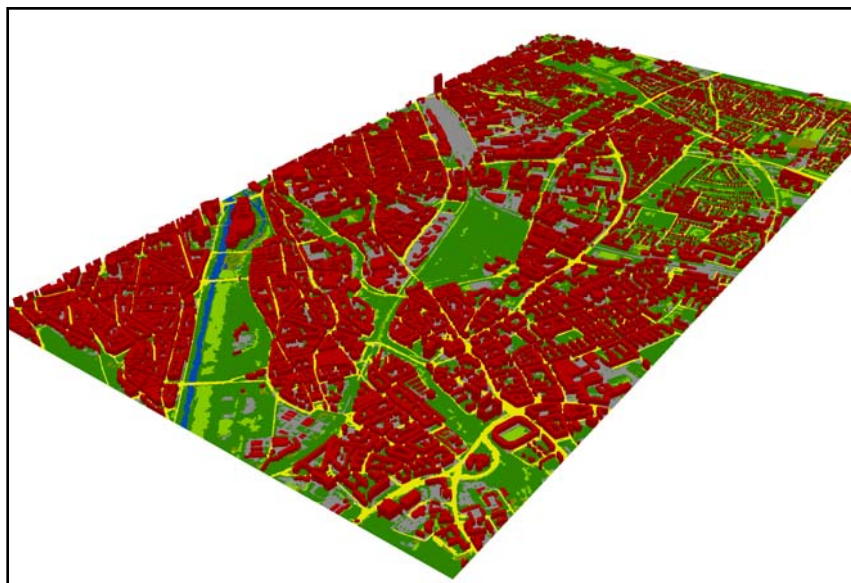
Zur Ableitung der urbanen Landbedeckung wird neben dem Höhenmodell ein hoch aufgelöster optischer Datensatz verwendet - in diesem Fall eine Ikonos-Aufnahme (siehe Kap. 4.1). Die spektralen Merkmale aus der Satellitenszene in Kombination mit größen- und formbasierten Parametern erlauben die Ableitung der Landbedeckungsklassen „Versiegelt“, „Wiese“, „Büsche/Bäume“, „offener Boden“ und „Wasser“. Für eine verbesserte Identifikation von Straßen können externe Informationen aus ATKIS oder beispielsweise aus dem nicht-kommerziellen OpenStreetMap-Projekt in die Klassifikation integriert werden. Abbildung 4-7 zeigt das Ergebnis der flächendeckenden Erfassung der Landbedeckung für das Untersuchungsgebiet.





**Abbildung 4-7: Landbedeckungsklassifikation, erstellt über kombinierte Auswertung von DOM-Informationen und multispektralen Satellitenbilddaten.** Die Karte zeigt das strukturelle Muster von Gebäuden, versiegelten Arealen, Straßenflächen, Baum und Weisenbeständen, offenem Boden und Wasserflächen in dem Ausschnitt rund um den Ostbahnhof.

Abbildung 4-8 illustriert die Möglichkeit eines perspektivischen Blicks auf den räumlichen Ausschnitt der Fallstudie unter Einbeziehung der Landnutzungsklassifikation und der DOM-Daten. Eine solche synoptische Perspektive eignet sich in besonderem Maße für eine baulich-räumliche Erfassung und Quantifizierung der Siedlungsstruktur. Neben einer Abgrenzung und Charakterisierung von Stadtquartieren lassen sich Freiflächen und urbanisierte Areale, mit zugehörigen Bebauungsdichten und –volumina, identifizieren.



**Abbildung 4-8: Perspektivische Ansicht eines 3D-Stadtmodells, das über eine kombinierte Auswertung von DOM-Daten und Ikonos-Satellitenaufnahmen erstellt wurde.** Die 3D-Darstellung vermittelt einen strukturellen Eindruck über Gebäudehöhen und –dichten, deren Anordnungen und Muster sowie die räumliche Lage von Freiflächen im Stadtgefüge. Der perspektivische Anblick bietet ein modellhaftes Abbild der Realität.

Eine in der Stadtplanung übliche Strukturierung des urbanen Raumes basiert auf sogenannten Stadtstrukturtypen. Die Idee der Stadtstrukturtypen zielt auf eine stadträumliche Flächengliederung auf Basis homogener physischer Parameter sowie homogener Flächennutzung ab (Wurm & Taubenböck, 2010). Diese Differenzierung des Stadtraumes ist vor allem vor dem Hintergrund erstrebenswert, dass auf diese Weise unterschiedliche Themen und Fragestellungen in einer gemeinsamen räumlichen Abgrenzung zusammengeführt und ausgewertet werden können (Breuste et al., 2001).

Typischerweise haben deutsche Städte jeweils individuelle und somit untereinander nur bedingt konsistente Kategorisierungen von Stadtstrukturtypen gefunden und umgesetzt. Die unabhängige Erfassung einer physischen Datengrundlage durch die Fernerkundung erlaubt es, Stadtstrukturtypen städteübergreifend konsistent abzuleiten und eine siedlungsstrukturelle Gliederung durchzuführen (Abbildung 4-9).

Auf Basis der Daten aus dem 3D-Stadtmodell und der Landnutzungsklassifikation werden die einzelnen Gebäude einer Analyse zugeführt, die charakteristische Merkmale unterschiedlicher Stadtstrukturen in einem vordefinierten Prozessablauf ausweist. Die Merkmale, welche für die Klassifikation der jeweiligen Strukturen verwendet werden, sind so formuliert, dass sie eine Übertragbarkeit gewährleisten. Neben der Charakterisierung des Gebäudes aufgrund seiner Form und Größe werden außerdem Merkmale auf Blockebene zur Klassifikation der Struktureinheit verwendet. Um diesen Ansatz zu verdeutlichen, werden exemplarisch für den Stadtstrukturtyp „Blockrandbebauung“ die relevanten Merkmale und Charakteristika für eine thematische Zuweisung aufgeführt: zusammenhängende Häuserfront, Innenhof, eine Gebäudehöhe von mindestens drei und nicht mehr als zehn Stockwerken, Geschossflächendichte höher als 1,75 und Versiegelungsgrad höher als 60 % (Wurm & Taubenböck, 2010).



**Abbildung 4-9: Automatisiert erstellte Stadtstrukturtypenklassifikation.** Für die Kartierung der Stadtstrukturen wurden Strukturmaße der Einzelgebäude (formbasierte Parameter) und Merkmale auf der Baublockebene (z.B. Grünanteil) verwendet, welche auf Basis des erstellten 3D-Stadtmodells berechnet und auf der Baublockebene zusammengefasst wurden. Die Kartierung wurde auf Grundlage eines hoch aufgelösten DOM in Kombination mit Ikonos-Satellitendaten generiert.

### *Bebauungsgrad*

Der Bebauungsgrad, auch als Gebäudedichte bezeichnet, wird durch das Verhältnis aller Gebäudegrundflächen zu der entsprechenden Bezugsfläche („Baublock“) berechnet. Die Bezugsflächen werden aus den Straßenflächen des ATKIS-Datensatzes abgeleitet, die Gebäudegrundflächen entstammen der Landbedeckungsklassifikation (vgl. Kapitel 4.1). Das Ergebnis ist für den Ausschnitt der Quartiersstudie in Abbildung 4-10 visualisiert. Der Bebauungsgrad weist für diesen Raumausschnitt der Stadt grundsätzlich eine Abnahme vom Zentrum im Nordwesten (Isarvorstadt) bis zur Einzelhausstruktur im Südosten (Ramersdorf-Perlach) auf. Die höhere Gebäudedichte der zentrumsnahen Viertel Isarvorstadt und Au-Haidhausen ist im Vergleich zu den Arealen südlich und südöstlich des Ostbahnhofs deutlich zu erkennen.





**Abbildung 4-10: Ermittelter Bebauungsgrad [%] für die Umgebung des Ostbahnhofs in München.** Die dargestellte Gebäudedichte wird durch das Verhältnis aller Gebäudegrundflächen zur Fläche des Baublocks berechnet. Die Karte bildet den hohen Bebauungsgrad innerstädtischer Areale sowie abnehmenden Bebauungsgrade mit zunehmender Distanz zum Zentrum hin ab.

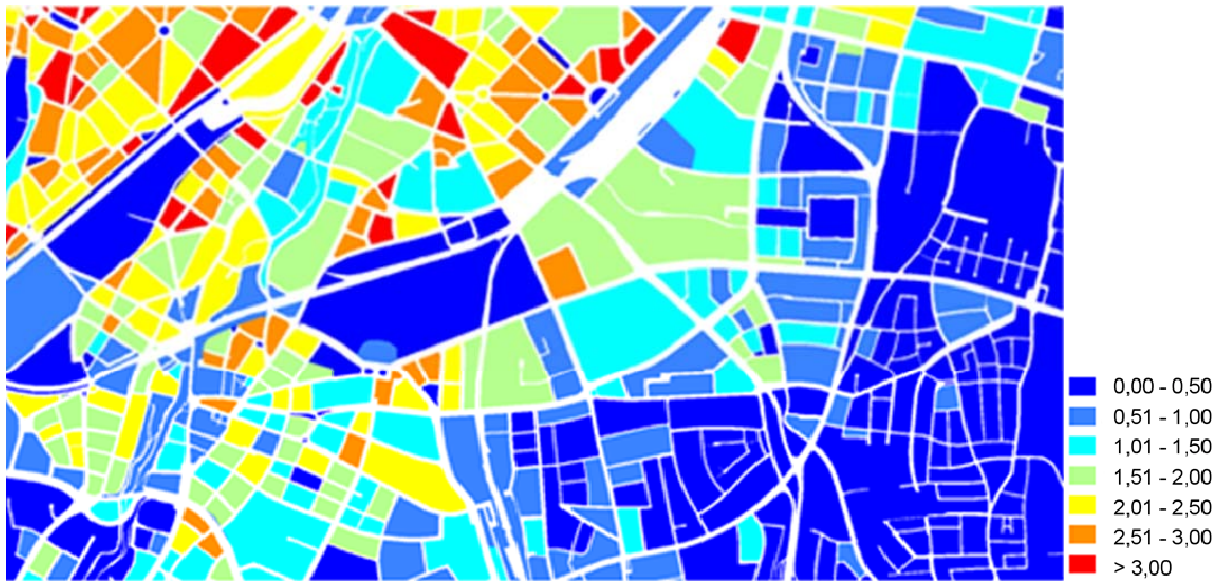
Analog kann der Versiegelungsgrad als Parameter zur Charakterisierung physisch-struktureller städtischer Muster herangezogen werden. Er berechnet sich aus der Addition der Gebäudefläche und der versiegelten Areale pro Referenzeinheit, wird aber in dieser Studie nicht separat aufgeführt.

#### *Bauvolumen / Geschossflächendichte*

Das Bauvolumen wird direkt aus den relativen Objekthöhen des 3D-Stadtmodells (vgl. Abbildung 4-8) abgeleitet. Die Berechnung erfolgt anhand der Multiplikation der Fläche der einzelnen Objekte mit der zugehörigen mittleren relativen Höhe. Ein verwandter Parameter, der in der Stadtplanung üblicherweise Anwendung findet, ist die Geschossflächendichte (GFD). Die Geschossflächendichte gibt den prozentualen Anteil der Summe aller Geschossflächen bezogen auf die Bezugsfläche an (Taubenböck et al., 2010).

Eine ähnliche räumliche Ausprägung, wie die des Bebauungsgrades, lässt sich im Untersuchungsgebiet auch für die GFD feststellen. Die GFD nimmt für das betrachtete Gebiet Werte von 0 bis 3,5 ein (Abbildung 4-11). Niedrige Geschossflächendichten weisen auf Bebauungstypen mit geringer Gebäudedichte und/oder niedrigen Gebäudehöhen hin. Einzel- und Doppelhausbebauungen haben typischerweise Werte um 0,5 (Pauleit, 1998). Im Ausschnitt weisen die Gebiete in Berg am Laim und Ramersdorf-Perlach mit Werten von über 3,5 auf hoch verdichtete Areale mit mehrstöckigen Gebäuden hin. Diese sind im Untersuchungsgebiet besonders in zentrumsnahen Arealen im Nordwesten sowie in Au-Haidhausen zu finden. Die dort dominierenden Blockrandbebauungen haben in der Regel mindestens fünf Stockwerke bei einer gleichzeitig hohen Gebäudedichte.





**Abbildung 4-11: Geschossflächendichte im Untersuchungsgebiet.** Die Berechnung erfolgt anhand der Multiplikation der Fläche der einzelnen Objekte mit der zugehörigen abgeschätzten Geschosszahl. Die Summe der Flächen aller Vollgeschosse pro Baublock wird durch die Fläche des Baublocks dividiert. Die Karte zeigt deutlich die hohen Geschossflächendichten in Innenstadtnähe mit 5-6 geschossiger Blockrandbebauung bei hoher Gebäudedichte, während in peripheren Gebieten dagegen die Geschossflächendichte typischerweise bei niedriger Einzelhausbebauung und geringen Gebäudedichten geringe Werte aufweist.

### *Grünanteil*

Die räumliche Verteilung sowie die Flächenanteile der städtischen Grünflächen sind zentrale Indikatoren z.B. zur Bewertung der Wohn- und Lebensqualität oder der mikroklimatischen Situation. Der Grünanteil - oder Vegetationsgrad - entspricht dem Verhältnis der Vegetationsfläche zur Bezugsfläche. Der Vegetationsgrad zeigt im Wesentlichen die bereits beschriebene siedlungsstrukturelle Zonierung des Stadtgebietes in dicht bebaute Innenstadtgebiete und locker bebaute Stadtrandgebiete bzw. unbebaute Bereiche. Mit Hilfe dieses Indikators werden die Isarauen und vor allem auch das Isarhochufer, das sich wie ein Band durch die Stadt zieht, sichtbar und quantifizierbar. Zudem sticht der Ostfriedhof als Grünareal aus den dicht bebauten Stadtteilen hervor.



**Abbildung 4-12: Grünanteil [%] pro Baublock.** Die Karte hebt Areale mit hohem Vegetationsanteil wie die Isaraue oder den Ostfriedhof hervor. Zudem zeigen die Einzelhausbebauungen in peripheren Arealen den hohen Vegetationsanteil, im Vergleich zu den vegetationsarmen Gebieten in Richtung des Stadtzentrums.

#### 4.2.2 Inventarisierung der Dachbegrünung

Dachbegrünung in urbanen Räumen impliziert eine Milderung der Folgen von Bodenversiegelung bei gleichzeitig verbesserter Aufnahme von Niederschlagswasser und positivem Einfluss auf das städtische Mikroklima. Doch aktuell gibt es keine verlässlichen, raumbezogenen Statistiken oder Informationen, wie viele Dächer in deutschen Städten begrünt sind oder sich für eine Begrünung eignen.

Wie bereits angeführt, macht sich die Fernerkundung zu Nutze, dass unterschiedliche Objekte auf Grund ihrer jeweiligen physikalischen und chemischen Eigenschaften ein anderes Reflexionsverhalten aufweisen. Somit zeichnet sich jedes Material bzw. jeder Oberflächentyp über das gesamte elektromagnetische Spektrum betrachtet durch einen charakteristischen Verlauf der Reflexion aus – die spektrale Signatur. Viele Objekte reflektieren ähnlich oder in bestimmten Spektralbereichen gleich. Typischerweise haben Vegetationsflächen im Wellenlängenbereich des nahen Infrarots mehr und im roten Spektralbereich fast durchweg weniger Reflexion als nicht photosynthetisch aktive Oberflächen. Auf der Analyse dieses Phänomens basiert der im Rahmen dieser Studie angewandte Algorithmus. Dieser identifiziert über einen Vegetationsindex - den sogenannten Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) - die begrünteren Areale innerhalb der in der Landnutzungsklassifikation ausgewiesenen Gebäudeflächen.

Grundsätzlich können Grünflächen mit einer sehr hohen thematischen Güte erfasst werden, allerdings hängt die Genauigkeit der abgeleiteten Dachbegrünung aufgrund des gewählten Ansatzes dabei auch von der Genauigkeit der generierten Gebäudemasken ab. Letztere liegt



im Bereich von 90 %, wie entsprechende Tests für verschiedene Städte gezeigt haben (vgl. Wurm et al., 2009 und 2011). Dementsprechend pflanzen sich Fehler in der Gebäudemasken bei der Erkennung von Dachbegrünungsflächen fort. Beispielsweise sind Fehler zu identifizieren, die auf fälschlicherweise als Gebäude klassifizierte, erhöhte Vegetationsobjekte zurückzuführen sind. Dementsprechend lässt sich die Genauigkeit über die Verwendung einer exakteren Gebäudemasken, z.B. ALKIS-Gebäudeumrisse, weiter steigern.

Eine Genauigkeitsanalyse für das Untersuchungsgebiet zeigt eine Gesamtgüte von 84 % hinsichtlich der ausgewiesenen Gründächer. Abbildung 4-13 zeigt die Lage und Form begrünter Dachflächen im Bereich des Untersuchungsgebiets. Das zusätzlich dargestellte Beispielgebäude stellt die Dachbegrünung eines Flachdaches der entsprechenden Klassifikation gegenüber.



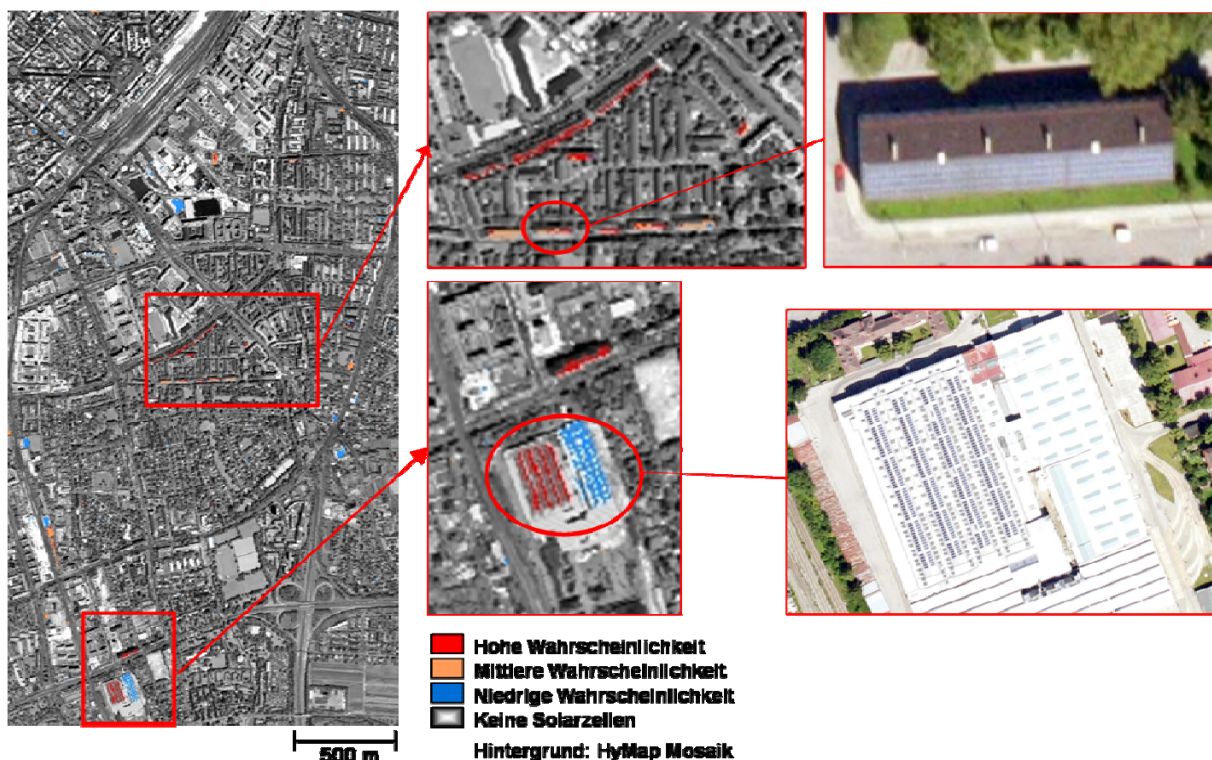
**Abbildung 4-13: Mittels fernerkundlicher Verfahren erfasste Dachbegrünung im Bereich des Münchner Ostbahnhofs.** Die Darstellung überlagert die klassifizierte Gebäudeflächen mit der Echtfarbandarstellung des Ikonos-Bildes. Dabei sind Gebäude mit Dachbegrünung ausgewiesen.

### 4.2.3 Inventarisierung von Solarflächen

In Deutschland hat sich im Zuge verlässlicher politischer Rahmenbedingungen in Verbindung mit einer hohen gesellschaftspolitischen Sensibilität ein attraktiver Photovoltaikmarkt und weltweit etablierter Solarindustriestandort entwickelt. Die Unternehmen haben die gewonnene Planungssicherheit genutzt, um Investitionen zu tätigen. Die Dokumentation dieser Entwicklung im Sinne einer raumbezogenen Verortung und Bewertung scheitert hingegen an der Verfügbarkeit geeigneter Erhebungen, die sowohl gesamtwirtschaftliche als auch regio-

nalökonomische Effekte und Zusammenhänge der Photovoltaikbranche berücksichtigen (Ruhl et al., 2008).

Eine Inventarisierung der Solarflächen, beispielsweise auf Dächern, stellt in diesem Zusammenhang einen Parameter dar, der von zentraler Bedeutung ist. Unter Verwendung von Hyperspektraldaten des Sensors HyMap können Solarflächen grundsätzlich erkannt werden, da sie sehr charakteristische spektrale Merkmale aufweisen (Heldens & Heiden, 2010). Das Ergebnis einer entsprechenden, automatisierten Bildanalyse ist in Abbildung 4-14 visualisiert. Dabei sind die kartierten Photovoltaikanlagen bzw. Solarflächen in drei Wahrscheinlichkeitsstufen wiedergegeben.



**Abbildung 4-14: Identifizierung von Solaranlagen auf Dächern über den Verschnitt von Gebäudemasse und Spektralindizes, die aus Hyperspektralaufnahmen abgeleitet wurden.** Die linke Abbildung zeigt das Ergebnis für ein kleines Gebiet im Osten von München, wobei in der Mitte zwei Baublöcke im Detail illustriert sind. Auf den Gebäuden in der oberen Detailabbildung gibt es laut Auswertalgorithmus mit hoher und mittlerer Wahrscheinlichkeit Solaranlagen auf den Dächern. Das Luftbild rechts zeigt, dass dies tatsächlich der Fall ist. Das untere Detailbild zeigt ein Gebäude mit einem Bereich, wo es mit hoher Wahrscheinlichkeit Solaranlagen gibt und daneben ein Areal, das lediglich eine geringe Wahrscheinlichkeit aufweist. Das Luftbild rechts zeigt, dass die Solaranlage an der westlichen (links) Seite des Gebäudes korrekt erkannt wurde und dass der rechte Teil des Gebäudes lediglich Dachfenster aufweist.

Das Ergebnis zeigt, dass für das Quartier um den Münchner Ostbahnhof nur vereinzelte Solarflächen auf Dächern identifiziert wurden. Hinsichtlich der erkannten Solarflächen weist das Ergebnis eine Genauigkeit von 85 % auf.



#### 4.2.4 Erfassung des Photovoltaikpotenzials

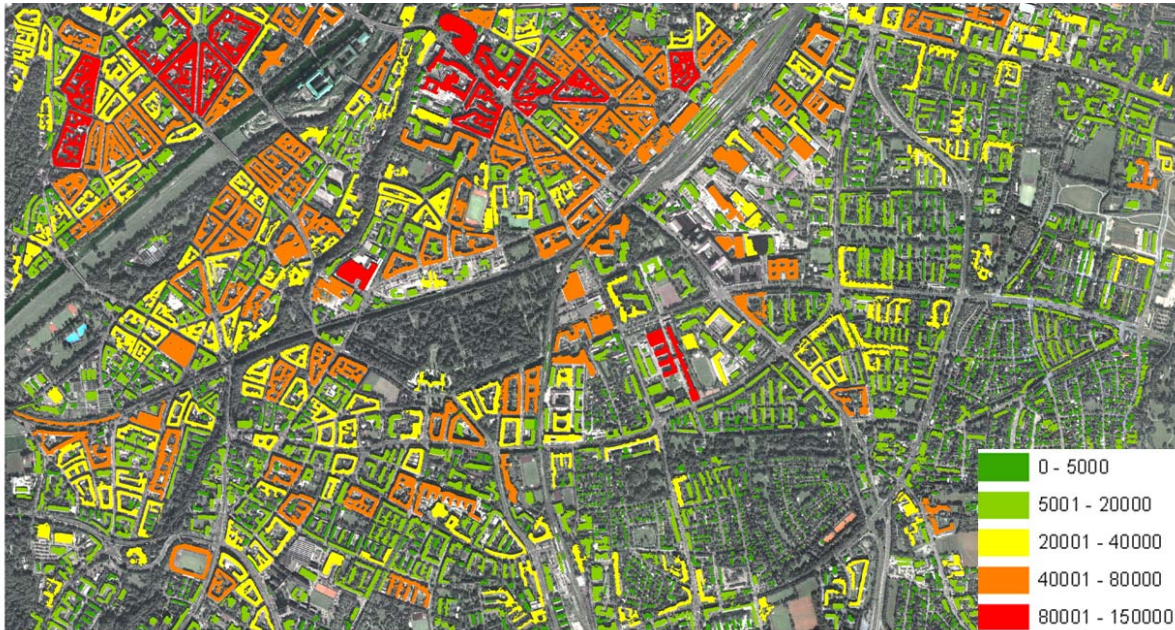
Um das Photovoltaikpotenzial zu berechnen, werden verschiedenste Parameter in ein Potenzialmodell integriert. Quantifiziert und bewertet werden dabei die extraterrestrische Strahlung, die Abschwächung der Einstrahlung durch die Atmosphäre, der diffuse Anteil der Einstrahlung, der Sonnenstand in Abhängigkeit von Tageszeit und Position, die Einstrahlung in Abhängigkeit des Sonnenstandes und der Position des Daches, die Ausrichtung und Neigung des Daches, der Einfallswinkel zwischen Sonnenstand (Zenith und Azimuth) und Neigung der Oberfläche sowie die Effekte der Abschattung. Zentrale Datengrundlage bildet erneut das DOM bzw. das abgeleitete Gebäudemodell. Die im Zuge dieser Studie eingesetzte Methodik zur Modellierung des Photovoltaikpotenzials ist detailliert in Tooke et al. (2009) beschrieben.

Abbildung 4-15 zeigt exemplarisch die errechnete mittlere Dachneigung für das Quartier um den Ostbahnhof. Auffallend sind die Flachdächer südlich des Ostbahnhofes, die typisch sind für die dort vorherrschende gewerbliche Nutzung.



**Abbildung 4-15: Mittlere Dachneigung, abgeleitet aus einem höchstauflösenden digitalen Oberflächenmodell.** Die Darstellung zeigt in 5° Schritten die Dachneigung der einzelnen Gebäude projiziert auf die klassifizierten Gebäudegrundflächen. Auffallend ist, dass Gewerbeareale, beispielweise südlich des Ostbahnhofes, überwiegend Flachdächer aufweisen, während Blockrand-, Zeilen- oder Einzelhausbebauungen überwiegend Giebelhäuser mit Neigungen von 30-50° zeigen.

Abbildung 4-16 zeigt die Einstrahlungsermittlung für den Monat Juni in Abhängigkeit der zuvor aufgeführten Parameter. Es wird deutlich, dass das Potenzial hoher, großflächiger Gebäude mit günstiger - d.h. südlich exponierter - Ausrichtung sehr hoch ist. Mit Blick auf die Inventarisierung der Solarflächen auf Dächern wird ersichtlich, dass das wirtschaftlich erschließbare Potenzial bei weitem noch nicht ausgereizt zu sein scheint.



**Abbildung 4-16: Exemplarische Ermittlung der solaren Einstrahlung pro Gebäude [kWh m<sup>2</sup>Tag<sup>-1</sup>] für den Monat Juni.** Diese Darstellung identifiziert u. a. große, hohe Gebäudekomplexe, bei denen eine besonders hohe solare Einstrahlung ermittelt wurde.

#### 4.2.5 Modellierung des quartiersbezogenen Wärmenetzpotenzials

Wie in vorangegangenen Kapiteln erläutert, basiert die Wärmeversorgung von Wohngebäuden und Gebäuden des öffentlichen und privaten Dienstleistungssektors in Deutschland primär auf der Nutzung von fossilen Energieträgern, die sehr häufig in überalterten Heizkesseln mit schlechten Wirkungsgraden und hohen Schadstoffemissionen verbrannt werden (Böhnisch et al., 2001). Erneuerbare Energien und KWK sind daher essentielle Bausteine für eine unabhängige und effiziente Energieversorgung, die sowohl die Endlichkeit der fossilen Rohstoffe als auch die bedrohlichen Auswirkungen eines zunehmenden Ausstoßes von Klimagasen berücksichtigt.

Unter welchen Bedingungen diese Form der Energiegewinnung effizient eingesetzt und genutzt werden kann, beruht vor allem auf einer räumlichen Eignungs- bzw. Standortanalyse, da nicht alle Gebäude bzw. physisch-strukturellen Anordnungen von Gebäuden gleich gut für die Anlage eines Nahwärmenetzes geeignet sind. Eine detaillierte Bestimmung des Potenzials leitungsgebundener Wärmeversorgung setzt die Berücksichtigung der räumlichen Verteilung baulicher Strukturen voraus (Blesl et al., 2001). Vor diesem Hintergrund prägt der Raum das Potenzial eines Gebäudes bzw. einer Region für die Nutzung effizienter und erneuerbarer Energieerzeugungstechniken.



### *Berechnung des Wärmebedarfs*

Anders als die bundesweite Regionalisierung des Wärmebedarfs erlaubt die räumlich und thematisch weitaus detailliertere Informationsgrundlage im Rahmen der Quartiersstudie eine Berechnung des Wärmebedarfs nach einem Bottom-Up Prinzip. Zentrale Datengrundlage bildet in diesem Zusammenhang das 3D-Gebäudemodell, welches eine gebäudescharfe Quantifizierung des Wärmebedarfs ermöglicht. Analog zur bundesweiten Potenzialstudie erfolgt zunächst die Berechnung eines spezifischen Wärmebedarfswertes, der in Abhängigkeit des Gebäudetyps, der Nutzung eines Gebäudes und des Gebäudealters sowie der klimatischen Situation gebildet wird.

Da der flächenspezifische Wärmebedarf maßgeblich durch die Nutzung eines Gebäudes beeinflusst wird, wird zu Beginn eine Differenzierung zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden durchgeführt. Dazu eignen sich die Blockdaten des ATKIS Basis-DLM, das im Objektbereich „Baulich geprägte Fläche“ (Objektgruppe (2100)) differenzierte Informationen hinsichtlich Nutzungskomponenten auf Baublock- bzw. Quartiersebene beinhaltet. In diesen wird zwischen Wohnbauflächen (2111), Industrie- und Gewerbeflächen (2112), Flächen gemischter Nutzung (2113) sowie Flächen besonderer funktionaler Prägung (2114) differenziert. Zusätzlich repräsentieren die Blockgeometrien siedlungsstrukturelle Grundeinheiten, die für die Berechnung weiterer Parameter, beispielsweise des Bebauungsgrads, notwendig sind.

Durch die Integration der Information aus dem ATKIS Basis-DLM ergeben sich im Siedlungsbereich drei primäre Nutzungskategorien für Gebäude - Wohnbauflächen, gemischt genutzte Flächen sowie Nichtwohnbauflächen. Wohnbauflächen weisen dementsprechend ausschließlich oder vorwiegend eine Wohnfunktion auf, während auf Flächen gemischter Nutzung keine der baulichen Prägungen wie Wohnnutzung oder industrieller und gewerblicher Nutzung dominiert. Nichtwohnbauflächen beinhalten sowohl gewerbliche als auch industrielle Nutzungsfunktionen sowie Flächen besonderer funktionaler Prägung. In die letztgenannte Kategorie fallen beispielsweise Nutzungsfunktionen wie „Verwaltung“, „Gesundheit und Soziales“ (z.B. Krankenhäuser) oder „Bildung und Forschung“ (z.B. Universitäten). Auf Basis dieser Informationen kann den Einzelgebäuden nicht direkt eine Nutzung im Sinne von Wohn- und Nichtwohngebäuden zugewiesen werden. Vor diesem Hintergrund werden charakteristische Anteile an Wohn- und Nichtwohngebäuden für unterschiedliche Siedlungstypen nach der Saarland-Studie (DLR, 1997) und Fishedick et al. (2007) verwendet. Die Bezeichnung der Siedlungstypen erfolgt in Anlehnung an die klassischen Untersuchungen von Winkens (1985) und Roth et al. (1980). Die Anteile der Gebäudetypen sind in Tabelle 4-2 aufgeführt. Der Siedlungstyp STII charakterisiert in diesem Zusammenhang primär Siedlungsstrukturen, die fast ausschließlich eine Wohnfunktion aufweisen, während der Siedlungstyp STIIIb dichte städtische Bebauung repräsentiert. Der charakteristische Anteil von Nichtwohngebäuden ergibt sich unter anderem aus der häufigen Einbindung von Gewerbe-



flächen im Erdgeschoss, wenngleich das restliche Gebäude primär eine Wohnfunktion aufweisen kann. Analog dominieren im Siedlungstyp STIV gewerbliche und industrielle Nutzungen, bei einem untergeordneten Anteil an Wohngebäuden.

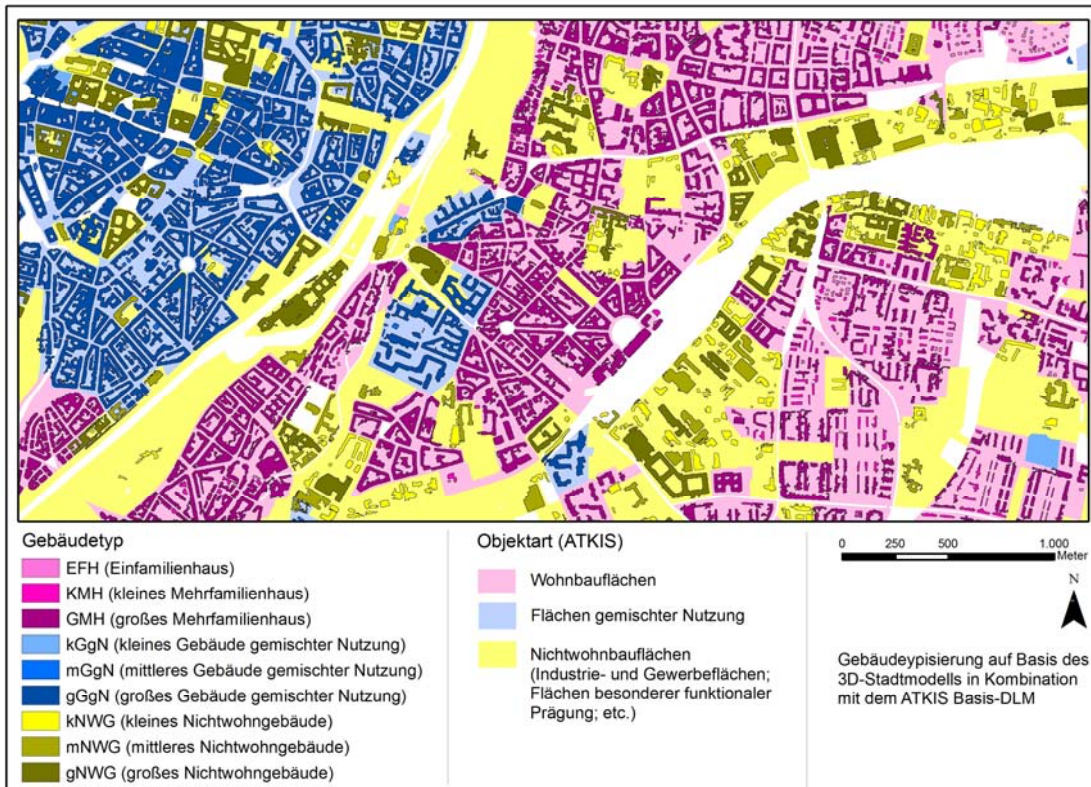
**Tabelle 4-2: Anteile der Gebäudetypen an unterschiedlichen Siedlungstypen (eigene Berechnung auf Basis von Fishedick et al., 2007).**

| Gebäudetyp       | Prozentualer Anteil der Gebäudetypen am Siedlungstyp STII | Prozentualer Anteil der Gebäudetypen am Siedlungstyp STIIb | Prozentualer Anteil der Gebäudetypen am Siedlungstyp STIV |
|------------------|---|--|---|
| Wohngebäude      | 97,2  | 70,3   | 10,5  |
| Nichtwohngebäude | 2,8   | 29,7   | 89,5  |

Diese Anteile werden verwendet, um auf Basis der ATKIS Informationen die Gebäude den Kategorien Wohnbauflächen (STII), Flächen gemischter Nutzung (STIIb) sowie Industrie- und Gewerbeflächen und Flächen besonderer funktionaler Prägung (STIV) mit idealtypischen Nutzungscharakteristika zuzuweisen. Die größenabhängige Aufteilung des Gebäudebestandes (vgl. Abbildung 4-17) wird auf Basis der Grundgesamtheit des Gebäudebestandes des Untersuchungsgebietes - differenziert nach Wohn- und Nichtwohngebäuden - durchgeführt. Die Schwellwerte werden dabei so gewählt, dass die Klassifikation der Wohngebäude mit den Zahlen der Infas-Typologie übereinstimmen (38 % klein, 36 % mittel, 26 % groß) und die Klassifikation der Nichtwohngebäude die Verteilung von Deutschland (82 % klein, 10 % mittel, 8 % groß) (Fishedick et al., 2007) widerspiegelt.

Um die Kennwerte der Referenzstudien für die vorliegende Detailstudie nutzbar zu machen, werden die Kennwerte, welche für kleine, mittlere und große Wohngebäude (Diefenbach & Ensling, 2007) sowie kleine, mittlere und große Nichtwohngebäude (Fishedick et al., 2007) ausgewiesen werden, mit den Anteilen für die unterschiedlichen Strukturtypen aus Tabelle 4-2 gewichtet.

Neben dem Typus und der Nutzung eines Gebäudes hat das Baualter zentralen Einfluss auf den Wärmebedarf. Allerdings lässt sich das Alter eines Gebäudes nur sehr bedingt über Erdbeobachtungsdaten abschätzen (z.B. über Zeitserienanalysen). Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Erdbeobachtung keine konsistenten, gebäudescharfen Datensätze zur Verfügung stellen kann, die mehr als 10-15 Jahre zurückreichen. Kommerzielle Satellitendaten sind seit 1972 verfügbar, wobei deren räumliches Auflösungsvermögen von 59 m bis maximal 15 m pro Pixel lediglich die Abschätzung der raumzeitlichen (Neu-)Entwicklung auf Ebene von Siedlungsblöcken oder Stadtquartieren erlaubt. Dementsprechend lassen sich ausschließlich Neubaugebiete oder Stadtteile, die seit 1972 neu entstanden sind, in ihrer Entstehung zeitlich und räumlich erfassen. Für eine gebäudescharfe Integration des Gebäudealters, die auch weiter zurückreichende Altersklassen beinhaltet, werden daher im Rahmen dieser Studie gebäudescharfe Daten von Infas-Geodaten herangezogen.



**Abbildung 4-17: Typisierter Gebäudebestand.** Auf Basis von flächenhafter Information zur Gebäudenutzung (ATKIS) wird der Gebäudebestand eingeteilt und zudem größenabhängig differenziert.

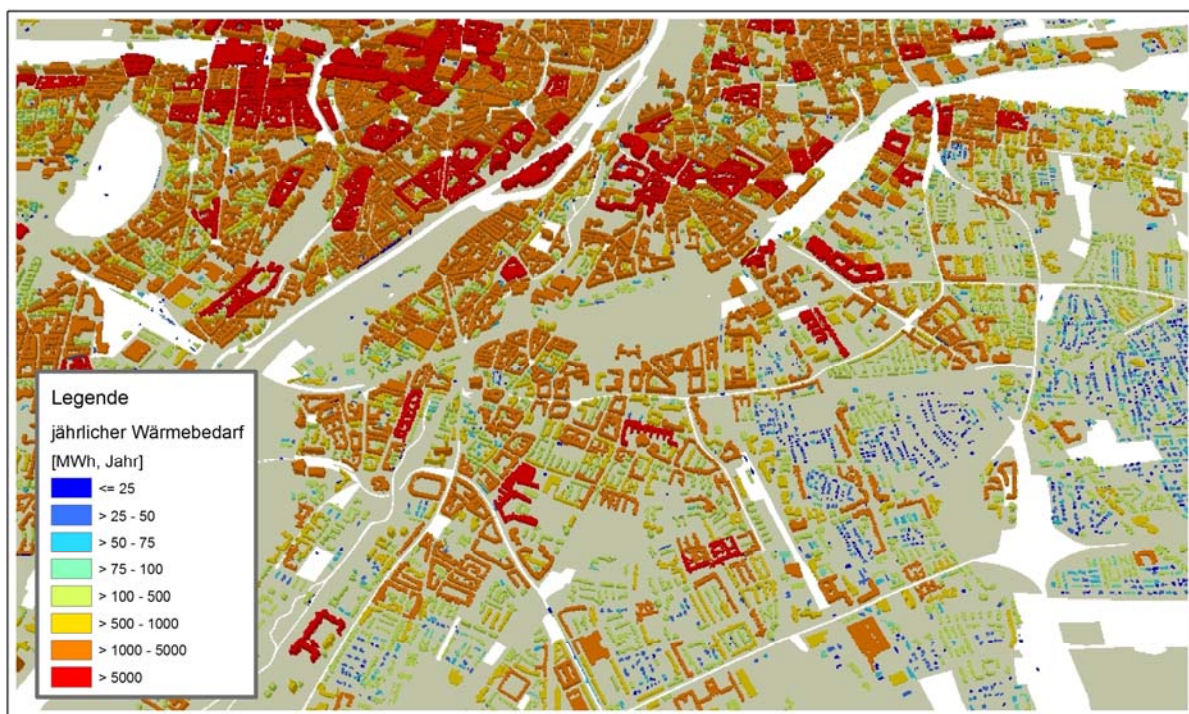
Für die Umrechnung der flächenbezogenen Wärmebedarfswerte der Referenzstudien (Fischedick et al., 2007; Diefenbach & Ensling, 2007) müssen die Kennwerte zusätzlich von einem Flächenbezug [ $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ] in einen Raumbezug [ $\text{kWh}/(\text{m}^3 \cdot \text{a})$ ] umgerechnet werden. Hierzu wird ein Umrechnungsfaktor aus Angaben der statistischen Jahrbücher (StJb 1991, 1998, 2004, 2009) zu Wohn- und Nichtwohngebäuden abgeleitet, der aus der Division des Rauminhaltes durch die zugehörige Gebäudefläche gebildet wird. Danach entspricht bei Wohngebäuden  $1 \text{ m}^2$  Gebäudefläche etwa  $4,56 \text{ m}^3$  Gebäudevolumen und bei Nichtwohngebäuden entspricht  $1 \text{ m}^2$  Gebäudefläche etwa  $6,12 \text{ m}^3$  Gebäudevolumen. Zudem wurde analog zu Kapitel 3 eine Korrektur der Kennwerte auf Basis der durchschnittlichen Gradtagzahl für die Stadt München vorgenommen, um die regionalklimatische Situation des Standorts zu berücksichtigen. Die Kennwerte sind in Tabelle 4-3 dargestellt. Die Tabelle der flächenbezogenen Kennwerte ( $[\text{kWh}/\text{m}^2]$ ) ist in Anhang A abgebildet.

Die Kennwerte werden in Abhängigkeit der Parameterausprägungen des jeweiligen Gebäudes mit dem wärmerelevanten Gebäudevolumen multipliziert. Für die Reduzierung des gesamten Volumens eines Gebäudes auf das wärmerelevante Volumen wird für kleine Gebäude der Faktor 0,7, für mittlere Gebäude der Faktor 0,75 und für große Gebäude der Faktor 0,8 verwendet (Sester et al., 2004). Die Werte implizieren, dass bei kleineren Gebäuden ein - relativ gesehen - geringeres Gebäudevolumen beheizt wird als bei größeren Bauwerken.

**Tabelle 4-3: Volumenspezifischer Raumwärmebedarf (anhand der Gradtagzahl Münchens korrigierte Werte auf Basis von Diefenbach & Ensling, 2007 und Fishedick et al., 2007).**

| Baualtersklasse | Heizwärmebedarf [kWh/m³*Jahr] |      |      |                   |      |      |                  |      |      |
|-----------------|-------------------------------|------|------|-------------------|------|------|------------------|------|------|
|                 | Wohngebäude                   |      |      | gemischte Nutzung |      |      | Nichtwohngebäude |      |      |
|                 | EFH                           | KMH  | GMH  | kGgN              | mGgN | gGgN | kNWG             | mNWG | gNWG |
| < 1900          | 61,2                          | 57,2 | 31,9 | 49,8              | 46,1 | 29,2 | 30,5             | 27,5 | 24,7 |
| 1900-1945       | 59,5                          | 35,7 | 37,3 | 48,7              | 31,9 | 32,8 | 30,4             | 25,7 | 25,1 |
| 1946-1960       | 60,2                          | 49,9 | 37,6 | 49,2              | 41,3 | 32,9 | 30,4             | 26,9 | 25,2 |
| 1961-1970       | 49,4                          | 44,9 | 35,9 | 42,0              | 38,0 | 31,8 | 29,5             | 26,5 | 25,0 |
| 1971-1980       | 39,0                          | 39,2 | 33,3 | 35,2              | 34,3 | 30,1 | 28,7             | 26,0 | 24,8 |
| 1981-1985       | 29,3                          | 33,3 | 33,3 | 28,8              | 30,4 | 30,1 | 27,8             | 25,5 | 24,8 |
| 1986-1995       | 40,6                          | 28,6 | 33,3 | 36,3              | 27,3 | 30,1 | 28,8             | 25,1 | 24,8 |
| 1996-2000       | 31,7                          | 21,8 | 33,3 | 30,4              | 22,8 | 30,1 | 28,0             | 24,5 | 24,8 |
| > 2000          | 29,3                          | 20,6 | 33,3 | 28,8              | 22,0 | 30,1 | 27,8             | 24,4 | 24,8 |

Das Ergebnis dieser Analyseschritte ist in der Wärmebedarfskarte für München in Abbildung 4-18 visualisiert.



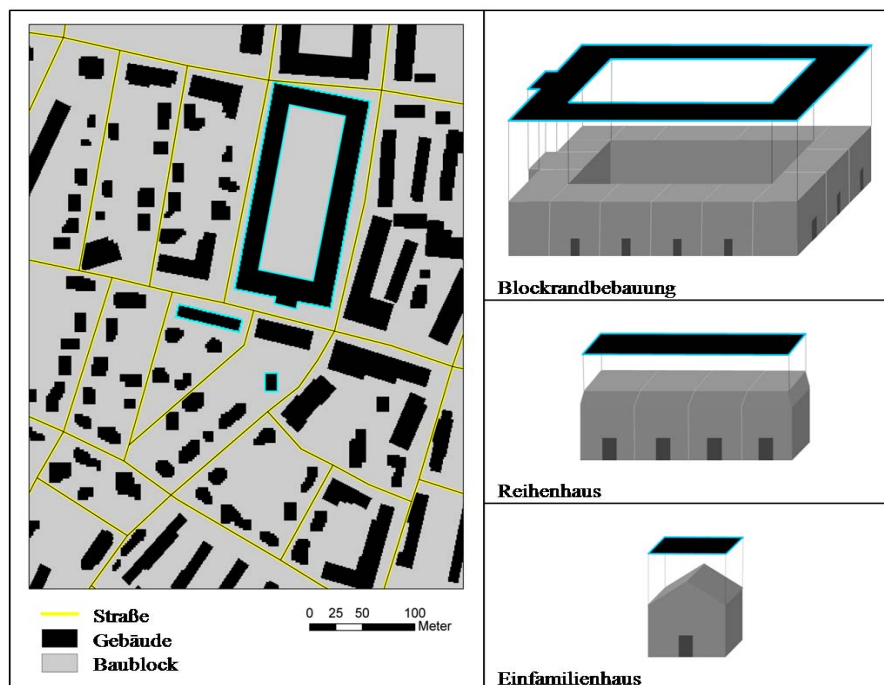
**Abbildung 4-18: Wärmebedarf im Stadtgebiet Münchens.** Gut zu erkennen sind die hohen Potenziale im verdichteten Innenstadtbereich (Mitte oben), während die lockere Wohnbebauung im südöstlichen Bereich des Ausschnitts vergleichsweise geringe Werte aufweist.

#### Infrastrukturelle Investitionskosten

Zur Ermittlung der Investitionskosten für die erforderliche Infrastruktur eines Nahwärmenetzes werden wiederum analog zur bundesweiten Analyse die Kosten der Hausübergabestationen, die Kosten einer konventionellen Wärmebereitstellung sowie die Kosten entsprechend der Netzlängen und Anschlussleitungen berechnet.

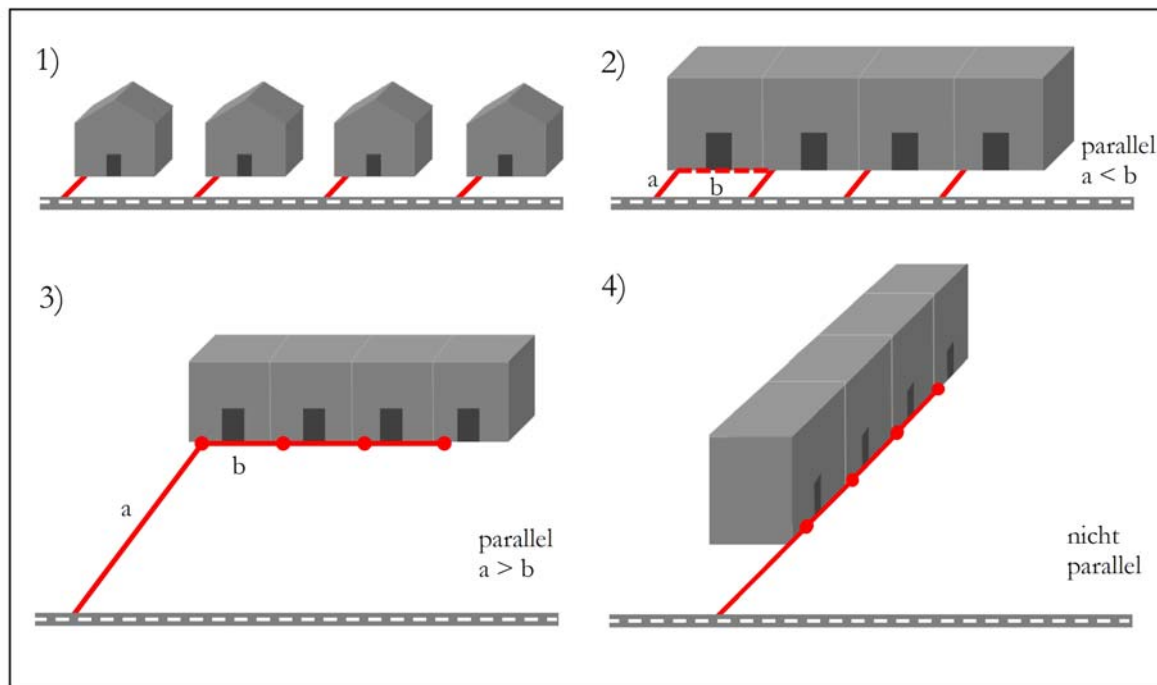


Abbildung 4-19 zeigt einen Raumausschnitt Münchens mit den aus Fernerkundungsdaten extrahierten Gebäuden. Wie dargestellt, repräsentieren die extrahierten Polygone nicht für alle Gebäudetypen die tatsächliche Gebäudeanzahl, sondern zeigen die morphologische Einheit eines Baublocks, die aus mehreren zusammenhängenden Einzelgebäuden bestehen kann. Für die drei markierten Gebäude in Abbildung 4-19 ist dieser Zusammenhang schematisch dargestellt. Während für Einfamilienhäuser die extrahierte Polygonfläche mit der Anzahl der Gebäude übereinstimmt, ist dies beispielsweise für Reihenhäuser oder Blockrandbebauungen nicht der Fall. Da die Gebäudeextraktion aus Fernerkundungsdaten primär auf der Höhe der Gebäude basiert, ist eine derartige Unterscheidung schwer möglich, da nur der gesamte Gebäudekomplex als solches, nicht aber die Einzelgebäude, erfasst werden. Relevant ist die tatsächliche Gebäudeanzahl für die Berechnung der Länge der Anschlussleitungen sowie der Anzahl der Hausübergabestationen und Heizkessel. Deshalb wird ein vom Gebäudetyp abhängiger Korrekturfaktor berechnet. Dazu werden Polygone der unterschiedlichen Gebäudetypen zufallsbasiert ausgewählt und mit Hilfe von Referenzdaten die tatsächliche Gebäudeanzahl bestimmt. Anschließend wird der Mittelwert für jeden Gebäudetyp gebildet und auf die Umrisslänge der Polygone umgerechnet. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass den Polygonen, abhängig von Gebäudetyp und Umrisslänge, eine realistische Schätzung der Gebäudeanzahl zugeordnet wird.



**Abbildung 4-19: Erfasste Gebäude innerhalb der Baublöcke sowie vereinfachte Kategorisierung von Gebäudetypen.** Diese Informationen fließen in die Berechnung der infrastrukturellen Investitionskosten ein. In der Abbildung ist ersichtlich, dass für Einfamilienhäuser die extrahierte Polygonfläche mit der Anzahl der Gebäude übereinstimmt. Dies ist für Reihenhäuser oder Blockrandbebauungen nicht der Fall. Vor diesem Hintergrund werden Polygone der unterschiedlichen Gebäudetypen zufallsbasiert ausgewählt und mit Hilfe von Referenzdaten die tatsächliche Gebäudeanzahl bestimmt. Anschließend wird der Mittelwert für jeden Gebäudetyp gebildet und auf die Umrisslänge der Polygone umgerechnet.

Für die Berechnung der Länge der Anschlussleitungen wird der Ansatz der bundesweiten Analyse erweitert, um unterschiedliche bauliche Konstellationen detaillierter berücksichtigen zu können (Abbildung 4-20). So wird zusätzlich die Hauptausrichtung eines Gebäudes in Bezug auf den nächstgelegenen Netzabschnitt berechnet.



**Abbildung 4-20: Konzept zur differenzierten Berechnung von Anschlussleitungen für verschiedene Gebäudetypen.** Auf Basis des Gebäudetyps, des Abstands eines Gebäudes zur Straße und der Orientierung des Gebäudes im Baublock werden unterschiedliche Berechnungskonzepte für die Länge der Anschlussleitungen angewendet.

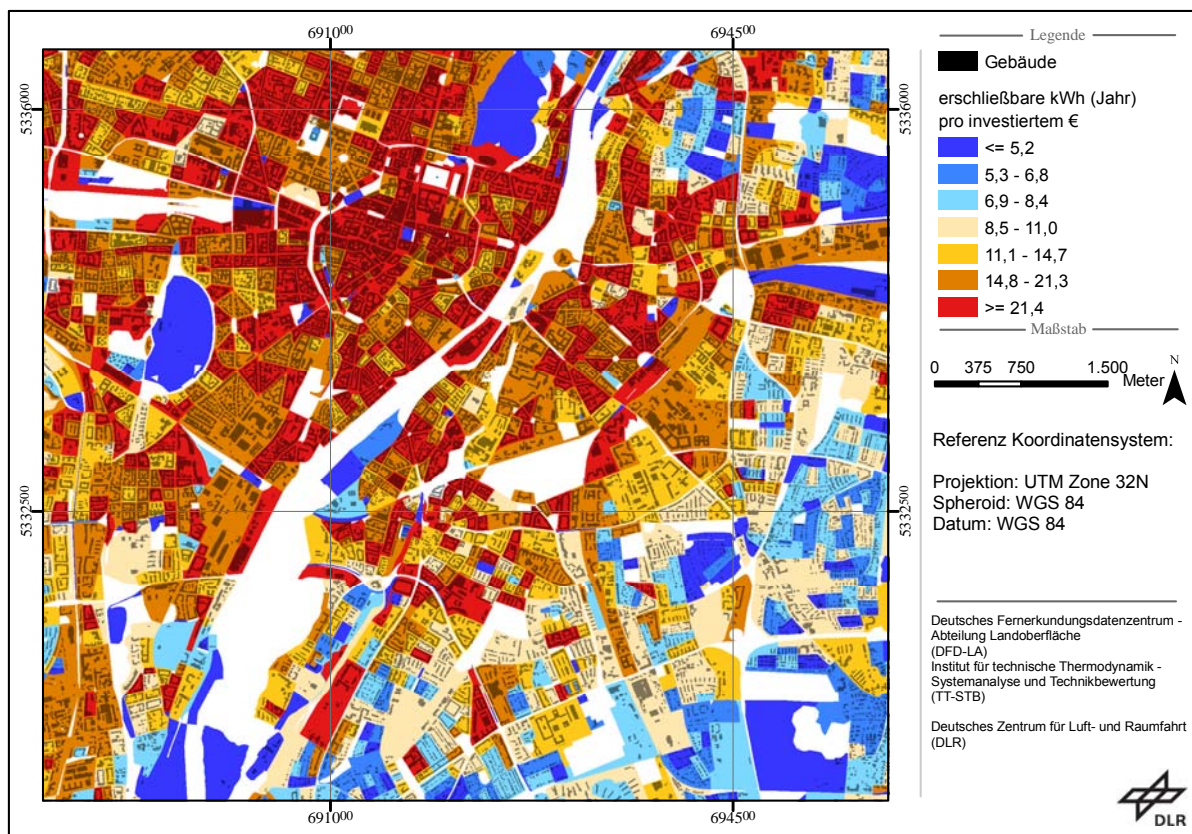
Analog zur bundesweiten Berechnung der Infrastrukturkosten werden die berechneten Ausprägungen der Parameter mit charakteristischen Kosten versehen.

#### *Ergebnisse der Potenzialmodellierung*

Ergebnis der Analyse ist eine räumlich differenzierte Ausweisung von Nahwärmepotenzialen auf Basis von Fernerkundungs- und Geodaten. Auf Quartiersebene werden demnach bauliche Strukturen identifiziert, die sich für die Errichtung eines Nahwärmenetzes besser eignen als andere. Das Resultat der entsprechenden Analyse ist für den Raumausschnitt Münchens in Abbildung 4-21 visualisiert.

Im Stadtgebiet von München ist die Werteabnahme vom innerstädtischen Kern zu den Randbereichen auffällig. Diese ist insbesondere auf die überdurchschnittliche Größe der Gebäude und eine höhere Gebäudedichte in der Innenstadt zurückzuführen. In Kombination mit vergleichsweise kurzen Leitungslängen bedingt dies insgesamt einen relativ hohen Potenzialwert. Randbereiche mit zahlreichen Ein- und Zweifamilienhäusern hingegen erhalten - relativ gesehen - ungünstige Potenzialwerte. Diese Siedlungsstrukturen haben in der Regel

einen viel geringeren Wärmebedarf, der auch durch niedrigere infrastrukturelle Erschließungskosten nicht kompensiert werden kann. Daraus ist allerdings keine grundsätzliche Nichteignung für Nahwärmenutzung abzuleiten, sondern im Kontext des betrachteten Raumausschnitts und den sehr günstigen, alternativen Standorten zu sehen. In Gebieten mit einer heterogenen Bebauungsstruktur ist eine hohe Variabilität der Werte zu beobachten. Eine idealtypische, radiale Abnahme der Potenzialwerte vom Zentrum zu den Randbereichen wird besonders von Baublöcken mit sehr großen, gewerblich oder industriell genutzten Gebäudekomplexen unterbrochen.



**Abbildung 4-21: Quartierbezogenes Wärmenetzpotenzial berechnet für das Stadtgebiet Münchens.** Wie beim Wärmebedarf stehen die hohen Potenziale im verdichteten Innenstadtbereich (Mitte oben) den vergleichsweise geringen Werten für die lockere Wohnbebauung im südöstlichen Bereich des Ausschnitts gegenüber.

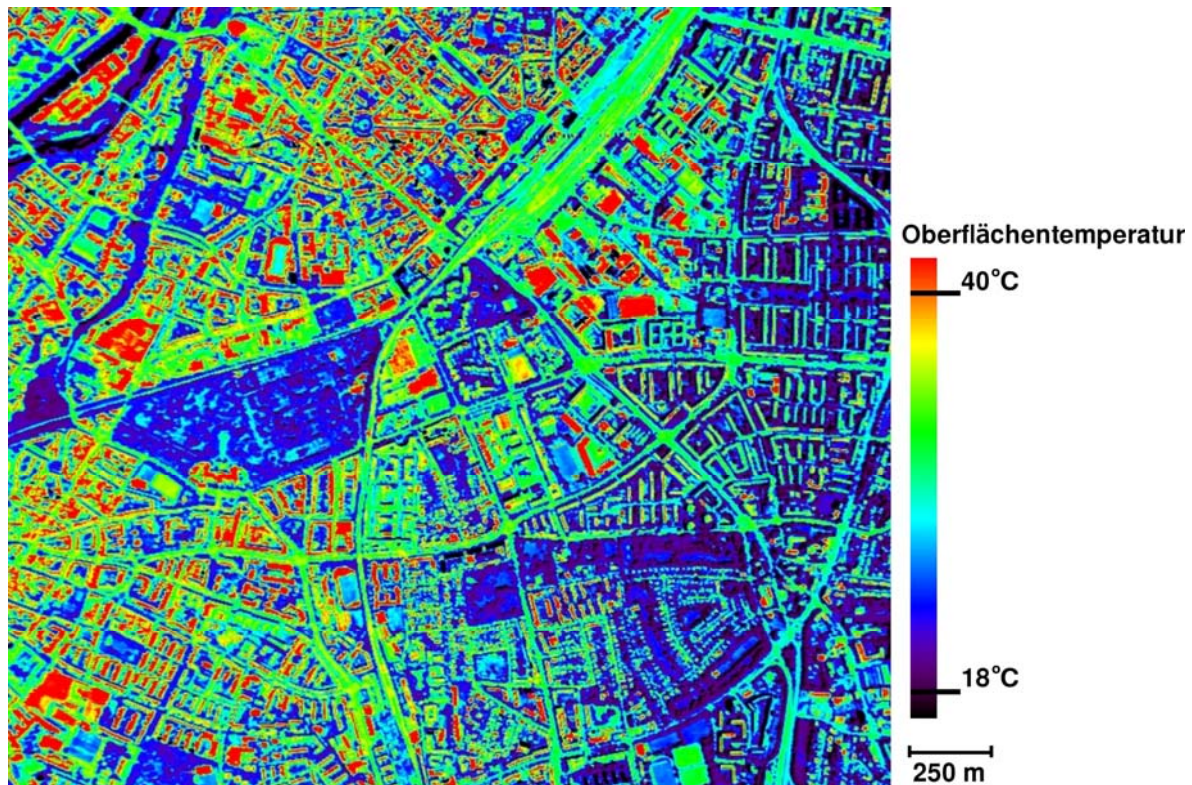
#### 4.2.6 Modellierung Mikroklima

Das Klima in Städten unterscheidet sich zumeist erheblich von den durchschnittlichen Bedingungen in seinem Umland. Typische Phänomene sind beispielsweise erhöhte Oberflächen- und Lufttemperaturen und veränderte Windströmungen.

Um das urbane Klima zu charakterisieren, kann in erster Näherung die Oberflächentemperatur betrachtet werden. Hier liegt ein entscheidender Vorzug der Erdbeobachtung, denn sie ermöglicht eine räumlich kontinuierliche Messung von Oberflächentemperaturen über große



Flächen hinweg. In Abbildung 4-22 ist eine Thermalaufnahme des flugzeuggetragenen Daedalus-Sensors dargestellt. Die Aufnahme wurde am 26. Juni 2007 am späten Vormittag aufgenommen. Das Thermalbild zeigt deutlich, dass Gebäude und auch Straßen eine erheblich höhere Oberflächentemperatur als Vegetation aufweisen. So stechen die Isar oder der stark begrünte Ostfriedhof durch ihre vergleichbar geringe Oberflächentemperatur ins Auge. In dicht bebauten Gebieten mit geringem Vegetationsanteil dagegen sind die Objekte eindeutig stärker aufgeheizt.



**Abbildung 4-22: Oberflächentemperaturen in München am späten Vormittag des 26. Juni 2007, erfasst mittels des flugzeuggetragenen Daedalus-Thermalsensors.** Die Abbildung zeigt ein Gebiet um den Münchner Ostbahnhof, welchen man in der oberen Bildhälfte mit mittleren bis hohen Oberflächentemperaturen (grün-blau) erkennen kann. Rechts im Bild liegt der Ostfriedhof, der durch seinen hohen Vegetationsanteil niedrige Oberflächentemperaturen aufweist. Grundsätzlich sieht man eine Temperaturgradienten von links oben (zentrumnah) nach rechts unten, wo die Bebauung lockerer ist und mehr Vegetationsflächen aufweist.

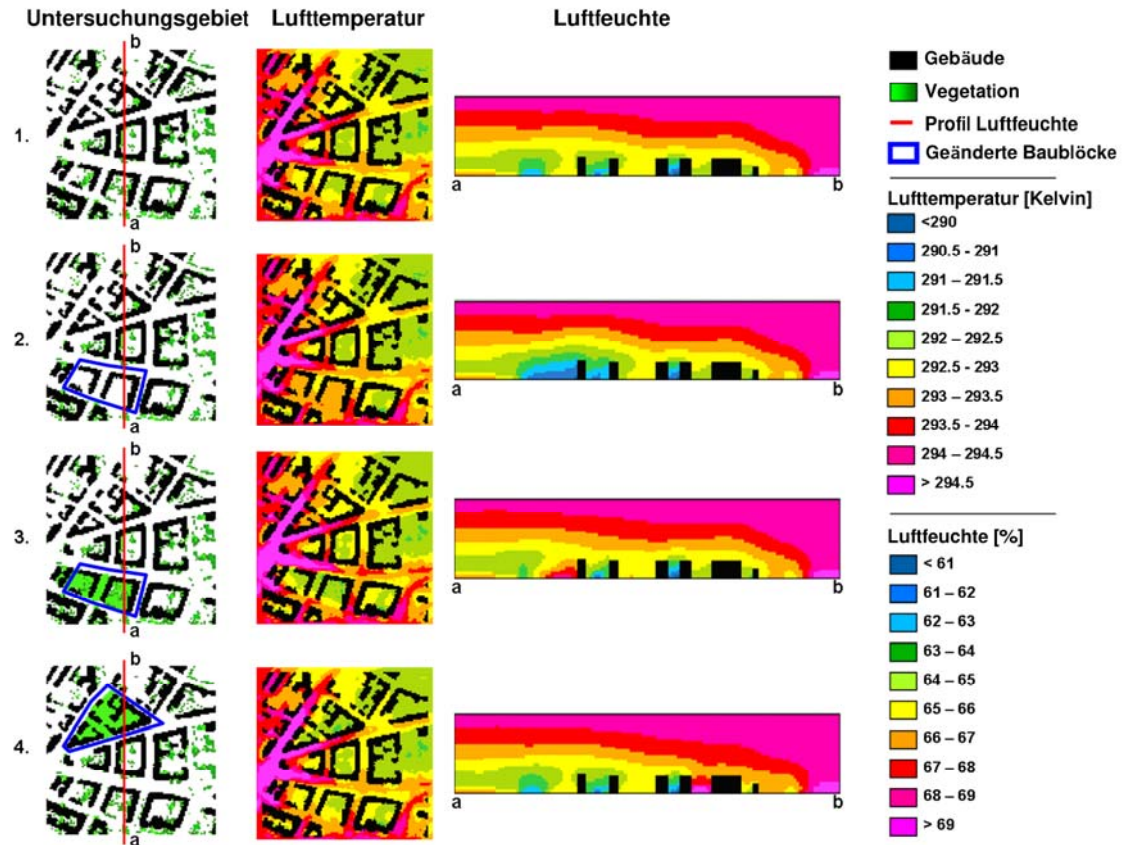
Die Oberflächentemperatur erlaubt aber nur bedingt Rückschlüsse auf die Lufttemperatur, Luftfeuchte oder Windgeschwindigkeit - also jene Klimaparameter, die für ein Mikroklima, das vom Menschen als angenehm empfunden wird, entscheidend sind. Vor diesem Hintergrund werden für flächendeckende Analysen zum urbanen Mikroklima in der Regel Klimamodellierungen eingesetzt. Im Gegensatz zu in situ Messungen - etwa von Wetterstationen - sind Klimamodelle in der Lage, das Mikroklima und deren Merkmale bzw. Ausprägung flächendeckend zu simulieren und abzubilden. Allerdings braucht man dazu auch flächendeckende Informationen über die lokalen Gegebenheiten, d.h. wie ist die Lage und Beschaffenheit der urbanen Strukturen, aus welchen Materialien bestehen sie, usw.



Um für ganze Stadtareale die notwendigen Eingangsdaten zur Modellierung des Mikroklimas bereitstellen zu können, hat Heldens (2010) eine Methodik entwickelt, die basierend auf Hyperspektralaufnahmen des HyMap-Sensors und einem aus HRSC-Daten abgeleiteten DOM großflächig die notwendigen Geoinformationen generiert. Zur eigentlichen Simulation werden die gewonnenen Daten - u.a. Informationen zur urbanen Topographie (Häuser, Bäume), den Oberflächenmaterialien, der Albedo und des Blattflächenindex (Maß zur Beschreibung der Vegetationsbedeckung) - in das Mikroklimamodell „NVI-met“ (Bruse & Fleer, 1998) eingespeist. Da dieses numerische Modell sehr rechenintensiv ist, ist eine Modellierung der mikroklimatischen Situation derzeit nur für einzelne Baublöcke möglich.

In Abbildung 4-23 ist das Ergebnis einer Szenario-Studie für ein Teilgebiet in München-Obergiesing dargestellt. Die Inputdaten für das Modell wurden aus den beschriebenen Fernerkundungsdaten abgeleitet (1). Als fiktive Szenarien zur Simulation der Auswirkungen veränderter stadtstruktureller Merkmale, wurde ferner von den blau markierten Baublöcken die vorhandene Vegetation entfernt und die nicht bebaute Fläche komplett versiegelt (2). Für das zweite Szenario wurden dagegen in den markierten Baublöcken die Freiflächen mit Bäumen bepflanzt. Um zusätzlich zu untersuchen, welchen Einfluss die Lage und Fläche der Vegetation auf das gesamte Untersuchungsgebiet hat, wurden in einem dritten Szenario die Freiflächen von zwei Baublöcken nördlich des Untersuchungsgebiets bepflanzt.

Als Ergebnisse der Simulationen mit dem ENVI-met Modell sind die Lufttemperaturen und die Luftfeuchte um 15:00 Uhr dargestellt (Abbildung 4-23). Der Wind kam in der Simulationen aus Südwesten. Die Abbildung zeigt, dass die Unterschiede in den Lufttemperaturen der verschiedenen Szenarien hauptsächlich in den veränderten Baublöcken entstehen. Dabei ist zu beobachten, dass die begrünten Flächen kälter und die versiegelten Flächen wärmer werden als im ursprünglichen Szenario. Bei der Luftfeuchte reichen die Änderungen, die mit der Begrünung oder Versiegelung einhergehen, teilweise auch über den fiktiv veränderten Baublock hinaus. Doch die größten Änderungen sind innerhalb des geänderten Baublocks wahrzunehmen. Bei einer Zunahme der versiegelten Fläche nimmt die Luftfeuchte signifikant ab, während bei einer Zunahme der Vegetation die Luftfeuchte deutlich zunimmt.



**Abbildung 4-23: Simulierte Lufttemperatur und Luftfeuchte von ausgewählten Baublöcken in Obergiesing für drei Szenarien.** Als fiktive Szenarien wurde in den blau markierten Baublöcken die vorhandene Vegetation entfernt und die nicht bebaute Fläche komplett versiegelt (2). Für das zweite Szenario wurden dagegen in den markierten Baublöcken die Freiflächen mit Bäumen bepflanzt (3). Um zusätzlich zu untersuchen, welchen Einfluss die Lage und Fläche der Vegetation auf das gesamte Untersuchungsgebiet hat, wurden in einem dritten Szenario die Freiflächen von zwei Baublöcken nördlich des Untersuchungsgebiets bepflanzt (4).

Obwohl diese Studie keine allgemein gültigen Aussagen liefern kann, können solche Simulationen und Szenariostudien helfen, den Effekt von baulichen Maßnahmen auf das Mikroklima vorab zu evaluieren. Auch kann man auf diese Weise verschiedene Maßnahmen austesten, um so für ein bestimmtes Viertel ein besseres Klima zu erreichen.

## 5 Fazit

Auf Basis der im Rahmen dieser Studie gewonnen Erkenntnisse werden im vorliegenden Kapitel zunächst die Resultate der bundesweiten Potenzialanalyse zum Aufbau von Wärmenetzen bewertet. Im Vordergrund stehen dabei neben einer Einschätzung der Aussagekraft und Belastbarkeit der Ergebnisse insbesondere eine Bewertung des Nutzens und potentieller Anwendungsfelder der generierten Verfahren und Geoinformationen. Darüber hinaus widmet sich ein zweites Unterkapitel der Machbarkeit quartiersbezogener – d.h. räumlich hoch detaillierter - Potenzialanalysen auf Bundesebene. Abschließend werden unter Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet und der weitere Forschungsbedarf skizziert.

### 5.1 Resultate der bundesweiten Analyse des Wärmenetzpotenzials

Wärmenetze haben eine besondere Bedeutung bei der Nutzung von erneuerbaren Energien und KWK im Wärmemarkt. So ist etwa der Einsatz von Tiefengeothermie zur Beheizung von Gebäuden ohne solche Netze überhaupt nicht möglich. Bei der Nutzung von solarer Wärme und von feuerungstechnisch problematischen Biomassefraktionen (z.B. Stroh, verschmutztes Holz, Rinde) können Wärmenetze zu deutlich kostengünstigeren Lösungen führen. Auch KWK-Anlagen lassen sich häufig erst ab einer gewissen Mindestgröße wirtschaftlich einsetzen, sodass auch hier eine Bündelung mehrerer Verbraucher über ein Wärmenetz äußerst vorteilhaft ist. Die Leitszenarien des BMU (z.B. Nitsch & Wenzel, 2009), welche unter bevorzugter Berücksichtigung erneuerbarer Energien eine nachhaltige Entwicklung des deutschen Energiesystems bis zum Jahr 2050 beschreiben, weisen Wärmenetzen daher eine entscheidende Rolle in der Wärmeversorgung der Zukunft zu.

Mit der vorliegenden, ganz Deutschland abdeckenden Analyse des Potenzials von Wärmenetzen auf Gemeindeebene konnten deutlich besser abgesicherte Werte für die räumliche Zuordnung und die Wirtschaftlichkeit von Wärmenetzen gewonnen werden als dies in der Vergangenheit der Fall war. Nahwärmepotenziale wurden für nahezu alle deutschen Gemeinden nachgewiesen. Die meisten Ausnahmen, welche im Gemeindemittel einen Wärmeabsatz von weniger als 500 kWh je Meter Trasse aufweisen, befinden sich in den ohnehin strukturschwachen Regionen im östlichen Brandenburg. Für die Wärmeverteilungskosten wurden für die einzelnen Gemeinden Werte zwischen 1,7 und 3,3 ct/kWh ermittelt. Die aus wirtschaftlicher Sicht günstigsten Strukturen finden sich dabei im Westen und Südwesten Deutschlands. Im Norden und insbesondere im Nordosten sprechen dagegen die Siedlungsstrukturen eher gegen den Ausbau von Wärmenetzen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung können prinzipiell gezielt für eine regionale Förderung eingesetzt werden. Neben den hier untersuchten siedlungsstrukturellen Faktoren wären aber auch noch weitere Parameter wie die demographische Entwicklung oder die lokale Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien zu prüfen. Um detaillierte Empfehlungen auch für die finanzielle Ausgestaltung eines regionalisierten Förderprogramms geben zu können, müsste die entwickelte Methode noch weiter verfeinert werden. Die Ansätze zu diesen Verfeinerungen werden in Kapitel 5.3 unten beschrieben.

Neben den primär adressierten Anwendungen in den Themenbereichen Energieeffizienz und Klimaschutz erscheinen hinsichtlich der entwickelten Techniken, aber vor allem auch der Zwischen- und Endprodukte, vielseitige Einsatzfelder in der Raumplanung und -beobachtung naheliegend. So lassen sich etwa verschiedene Ausprägungen des Baubestands und der Siedlungsstrukturen quantitativ beschreiben - und dies mitunter bis hin auf die Ebene von Quartieren. Sofern im Rahmen der Fortführung der zu Grunde liegenden Geobasisdaten zur Lage und Grundfläche der Gebäude auch stets der alte Stand konserviert wird, kann eine hoch detaillierte Beschreibung der raum-zeitlichen Entwicklung des Gebäudebestands erfolgen. Dies würde völlig neue Perspektiven für verschiedenste Anwendungen im Bereich der nachhaltigen Siedlungsentwicklung eröffnen.

## **5.2 Machbarkeit quartiersbezogener Potenzialsanalysen auf Bundesebene**

Wie im Rahmen der Studie demonstriert, bieten quartiersbezogene Raumanalysen ein vielversprechendes und breit gefächertes Anwendungspotenzial. Dieses reicht von diversen Fragestellungen zur Energieeffizienz und zum Klimaschutz bis hin zu verschiedensten stadt- und raumplanerischen Einsatzfeldern. Vor diesem Hintergrund kann konstatiert werden, dass eine bundesweit flächendeckende Erhebung und Auswertung von Geoinformationen auf Ebene von Quartieren völlig neue Möglichkeiten hinsichtlich der raumstrukturellen Kennzeichnung und Bewertung von Siedlungsflächen eröffnet. So lassen sich zahlreiche, bislang nur auf empirischer oder räumlich abstrahierter Basis durchführbare Betrachtungen – etwa im Rahmen der Raumb Beobachtung, der Energieversorgung, der Infrastrukturplanung oder Verkehrs- und Mobilitätsforschung – in eine nutzerorientierte Dimension bzw. praxisnahe Umsetzung überführen.

Allerdings stellt das Ziel einer bundesweiten, räumlich und thematisch hoch detaillierten Auswertung siedlungsstruktureller Gegebenheiten eine enorme Herausforderung hinsichtlich der Machbarkeit solcher Raumanalysen dar – gerade unter ökonomischen Gesichtspunkten. Entscheidende Faktoren sind in diesem Kontext das Vorhandensein geeigneter raumbezo-

gener Daten sowie die Verfügbarkeit einer Methodik zur zeit- und kosteneffizienten Erstellung der zu Grunde liegenden Geoinformationen.

Im Zuge der vorliegenden Studie wurde aufgezeigt, dass die entwickelten Techniken eine in wesentlichen Teilen automatisierte Verarbeitung und Auswertung der genutzten Datenbestände ermöglichen. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass sich das Gros der dargestellten Analysen grundsätzlich mit vertretbarem Aufwand für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland umsetzen lässt. Entscheidende Voraussetzung - und somit limitierender Faktor - für den effizienten Einsatz der Verfahren ist jedoch das Vorhandensein einer geeigneten Datengrundlage. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen sind diesbezüglich folgende Voraussetzungen unabdingbar:

- Flächendeckung für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland
- Bundeseinheitliche Standardisierung (Erhebung, Verarbeitung, Qualität)
- Digitales Format (Verknüpfung und Verschneidung; automatisierte Verarbeitung und Auswertung; definierte Datenqualität)
- Raumbezug in ausreichender Detaillierung (quartiersscharf)
- Präzise Verortung und Geometrie (v.a. Gebäudebestand, Straßennetz)
- Geeignete Semantik (z.B. Gebäudealter)
- Aktualität und Perspektive der Fortschreibung
- Zentrale Datenvorhaltung (Minimierung Zeit- und Kostenaufwand)
- Vertretbare Anschaffungskosten bzw. kostengünstiger oder -freier Zugang

Die hier formulierten Voraussetzungen werden lediglich von einigen wenigen Datenbeständen erfüllt – allen voran von den Geobasisdaten der amtlichen Vermessung. Diese werden flächendeckend in standardisierter Form von den Landesvermessungsämtern erhoben und liegen weitestgehend in digitaler Form vor. Hinzu kommt, dass nachgeordneten Bundesbehörden über das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) ein kostenfreier Zugang zu den Datenbeständen ermöglicht wird. Mit leichten Einschränkungen werden auch Satellitenaufnahmen und bestimmte kommerziell vertriebene Daten mit Raumbezug - etwa statistische oder klimatologische Informationen - den formulierten Anforderungen gerecht.

Abgebildet auf das Ziel einer bundesweiten Umsetzung energierelevanter Raumanalysen auf Quartiersebene ergibt sich vor diesem Hintergrund für die einzelnen Analysen folgende Einschätzung hinsichtlich ihrer Durchführbarkeit:

### *Bestimmung des Wärmenetzpotenzials*

Die Erfahrungen aus dieser Studie haben gezeigt, dass eine bundesweite Bestimmung des Wärmenetzpotenzials mit vertretbaren Einschränkungen auf Baublockebene durchgeführt werden kann. Der Gebäudebestand bzw. die zugehörigen Grundflächen können hinreichend genau aus DTK-25V abgeleitet werden (siehe Kap. 3). Für einige Bundesländer (z.B. Thüringen) gibt es jedoch klare Einschränkungen hinsichtlich der Aktualität der Daten. So weisen einige der Kartenwerke den Stand aus den frühen 1990er Jahren auf. Eine vielversprechende und sicherlich optimale Alternative zur Ableitung des Gebäudebestandes aus den Beständen der DTK25-V stellt die Nutzung von Hausumringen aus dem Automatisierten Liegenschaftskataster (ALK) bzw. in Bayern der Digitalen Flurkarte (DFK) dar. Diese sind derzeit für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland verfügbar, enthalten aber keine zusätzliche Attributierung wie beispielsweise Gebäudehöhe oder -alter. Die Kosten des Datensatzes liegen bei 100.000 €.

Höheninformationen werden aktuell nicht flächendeckend und zentral vorgehalten. Bisher wurde die Gebäudehöhe über die empirische Schätzung der Geschosszahl auf Basis der Grundfläche oder über die Disaggregation statistischer Kennwerte ermittelt. Die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) strebt an, ab 2013 ein 3D-Gebäudemodell in der Realisierungsstufe LoD1 (Blockmodell bzw. Klötzchenmodell mit Flachdach) bundesweit einheitlich zur Verfügung zu stellen (AdV, 2010). Teilweise ist dieser Datensatz in einigen Bundesländern, wie etwa in Bayern und Schleswig Holstein, bereits realisiert und verfügbar. Weiterhin können Gebäudehöhen auf Baublockebene auch aus digitalen Oberflächen- bzw. Geländemodellen abgeleitet werden. Hier bieten sich einerseits die Daten von LIDAR-Befliegungen an, die flächendeckend für die einzelnen Bundesländer von der jeweiligen Landesvermessung bereitgestellt werden. Die geometrische Auflösung der Höhendaten liegt bei 1-4m. Eine Alternative stellt das gegenwärtig von der Euromap GmbH aus IRS-P5 Cartosat-1 Stereo PAN Daten generierte Höhenmodell dar. Dieses Modell weist eine Bodenauflösung von 5 m auf und kostet für eine deutschlandweite Abdeckung rund 1,6 Mio € (4,50 € / km<sup>2</sup>).

Informationen zu Straßen und Nutzungskomponenten (Gewerbe, Wohnen) sowie eine Abgrenzung von Baublöcken können hinreichend genau über ATKIS Daten abgeleitet werden. Für nachgeordnete Bundesbehörden werden diese Daten vom BKG kostenfrei bereitgestellt.

Das Gebäudealter ist mit vertretbarem Aufwand für Gesamtdeutschland lediglich aus Infas Daten zu beziehen. Die Kosten belaufen sich auf rund 25.200 €. Exakte Informationen zur Genauigkeit des Datensatzes liegen leider nicht vor. Theoretisch ließe sich das Gebäudealter auch über eine Auswertung historischer DTK25 ermitteln. Allerdings ist davon auszuge-



hen, dass entsprechende Datenbestände nicht flächendeckend und in einheitlichen Zeitschnitten vorliegen.

Die benötigten Informationen zu den klimatischen Randbedingungen lassen sich hinreichend genau über die im Rahmen der Studie genutzten Daten des DWD beziehen. Für den entsprechenden Datensatz sind Kosten in Höhe von rund 480 € zu veranschlagen.

#### *Typisierung Stadtstruktur*

Die Möglichkeiten zur bundesweiten Bestimmung der Stadtstrukturtypen sind abhängig von der Datenlage. Mit Blick auf die im Rahmen der Fallstudie vorgestellte Methodik ist insbesondere die Verfügbarkeit geeigneter Höheninformation als limitierender Faktor zu bewerten. Hier gelten die gleichen Rahmenbedingungen wie zuvor im Kontext der Wärmenetzpotenzialbewertung erörtert. Die ideale Datenbasis stellt sicherlich das für 2013 angekündigte 3D-Gebäudemodell in der Realisierungsstufe LoD1 (Blockmodell bzw. Klötzchenmodell mit Flachdach) dar. Unter Verwendung dieses Datensatzes bleibt noch die Einbindung von Informationen zur Bodenbedeckung (v.a. Grünanteil). Diese lassen sich sehr gut über die Auswertung multispektraler Satellitendaten ableiten. Als Datengrundlage bietet sich ein für die Bundesrepublik Deutschland flächendeckend vorliegendes Mosaik aus Aufnahmen des deutschen RapidEye-Systems an. Der Sensor des RapidEye verfügt über fünf spektrale Aufnahmekanäle und eine Bodenauflösung von rund 6,5 m pro Pixel.

Eine Ableitung vereinfachter Stadtstrukturtypen ist allerdings auch unter Auswertung der Gebäudegrundfläche und der Bodenbedeckung – sprich ohne Berücksichtigung der Gebäudehöhe – möglich. Ein alternatives Verfahren zur Bestimmung von Stadtstrukturtypen auf Basis von Informationen zu den Gebäudegrundflächen innerhalb von Baublöcken konnten Meinel et al. (2008) in einer entsprechenden Studie demonstrieren.

#### *Dachbegrünung*

Die Identifizierung begrünter Dachflächen ist über eine Verschneidung von Daten zum Gebäudebestand (z.B. Gebäudegrundfläche aus DTK25-V, Hausumrisse aus ALKIS) und der Vegetationsbedeckung (z.B. abgeleitet aus RapidEye Daten) möglich. Grundsätzlich ist auch die Kombination von Luftbildern und Hausumringen denkbar, was allerdings aufgrund des großen Datenaufkommens durch die kleinräumigen und hoch detaillierten Luftbilder für eine deutschlandweite Berechnung einen enorm gesteigerten Prozessierungsaufwand nach sich ziehen würde.

#### *Solarflächen*

Wie in Kapitel 4.2.3 bereits beschrieben, ist die Identifikation von Solarflächen über eine Kombination des „Hydrocarbon Index“ nach Kühn et al. (2004) und einer Auswertung der mittleren Reflexion im Spektralbereich von 0.5  $\mu\text{m}$  – 1  $\mu\text{m}$  möglich. Die für derartige Analy-

sen erforderliche spektrale Auflösung ist zurzeit nur mittels Daten flugzeuggetragener Hyperspektralsensoren möglich. Eine deutschlandweite Erfassung der Solarflächen ist daher aktuell nicht realisierbar, da eine deutschlandweite Befliegung zu kostenintensiv ist. Datenerhebungen für einzelne Städte bzw. Gemeinden haben sich jedoch bewährt - zumal sich mit Hyperspektraldaten ein breites Spektrum weiterer Anwendungen bedienen lässt.

#### *Photovoltaikpotenzial*

Für eine Berechnung des Photovoltaikpotenzials ist eine Detailanalyse der Dacheigenschaften notwendig. Diese setzt sehr hoch aufgelöste Höhendaten mit einer geometrischen Auflösung  $< 1$  m voraus. Großflächige Modellierungen in diesem Detaillierungsgrad sind zudem äußerst rechenintensiv. Eine deutschlandweite Ableitung des Photovoltaikpotenzials erscheint daher derzeit nicht praktikabel und ist nur für einzelne Gemeinden sinnvoll. Mit der geplanten Umsetzung des 3D-Gebäudemodells der AdV in der Realisierungsstufe LoD2 (Klötzchenmodell mit Standarddachformen) wäre eine feinere Schätzung der Fläche und Ausrichtung gegebenenfalls möglich. Derzeit gibt es allerdings noch keine konkreten Pläne der AdV für eine bundesweite Implementierung der LoD2.

#### *Mikroklima*

Für die Simulation des Mikroklimas sind detaillierte Daten zum Gebäudebestand (Lage, Höhe) als auch eine detaillierte Kartierung der Oberflächenmaterialien mit je einer geometrischen Auflösung  $< 5$  m nötig. Sowohl der inhaltliche als auch der geometrische Detaillierungsgrad der Materialkartierung kann aktuell nur von flugzeuggetragenen Hyperspektraldaten bereitgestellt werden. Zur Beschreibung des Mikroklimas müssen diese Daten in eine entsprechende Simulationssoftware eingespeist werden. Da es sich dabei in aller Regel um numerische Klimamodelle handelt, die eine Vielzahl von Parametern berücksichtigen, ist eine solche Mikroklimasimulation mit enormem Prozessieraufwand verbunden. Eine bundesweite Charakterisierung der mikroklimatischen Gegebenheiten im Siedlungskörper erscheint daher derzeit nicht realistisch. Nichtsdestotrotz bietet eine Verknüpfung von Mikroklimasimulationen für Städte oder Stadtteile mit Daten zur Stadtstruktur die Möglichkeit einer empirischen Bestimmung von Zusammenhängen zwischen Mikroklima und strukturellen Ausstattungsmerkmalen. Kann dieser Zusammenhang hinreichend genau erklärt werden, lässt sich somit über die Auswertung stadtstruktureller Merkmale (siehe Abschnitt „Typisierung Stadtstruktur“) die mikroklimatische Situation im Siedlungskörper abschätzen.

Eine zusammenfassende Bewertung der Machbarkeit quartiersbezogener Potenzialanalysen auf Bundesebene wird in Tabelle 5-1 gegeben.

Tabelle 5-1: Zusammenfassende Bewertung der Machbarkeit quartiersbezogener Potenzialsanalysen auf Bundesebene.

|                                | Wärme-<br>netzpo-<br>tenzial    | Dachbe-<br>grünung                | Stadt-<br>struktur | Solar-<br>flächen                           | Photovol-<br>taikpoten-<br>zial   | Mikroklima |
|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------|---|---|------------|
| Gebäudegrundfläche             | x                               | x                                 | x                  | (x)   |   | x          |
| Gebäudehöhe                    | x                               |                                   | x                  |   |   | x          |
| Gebäudealter                   | x                               |                                   |                    |   |   |            |
| Straßennetz                    | x                               |                                   |                    |   |   |            |
| Gradtagzahlen                  | x                               |                                   |                    |   |   |            |
| Nutzung                        | x                               |                                   |                    |   |   |            |
| Bodenbedeckung<br>(Vegetation) |                                 | x                                 | x                  |   |   |            |
| Dachfläche                     |                                 |                                   |                    |   | x   |            |
| Dachausrichtung                |                                 |                                   |                    |   | x   |            |
| Dachneigung                    |                                 |                                   |                    |   | x   |            |
| Oberflächenmaterial            |                                 |                                   |                    | x   |   | x          |
| Eingangsparameter              | Mögliche<br>Datenquelle         | Verfügbarkeit für<br>Bundesgebiet |                    | Kosten für<br>Bundesgebiet                  | Anmerkungen   |            |
| Gebäudegrundfläche             | DTK-25                          | Gegeben                           |                    | Kostenfrei *                                | Aktualität teilweise sehr heterogen; Datenquelle: BKG; Landesvermessungsämter |            |
|                                | Hausumringe                     | Gegeben                           |                    | 100.000 €<br>(Stand:<br>31.12.2010)         | Datenquelle: ALK  |            |
|                                | 3D-<br>Gebäudemodell LoD1       | Gegeben ab Anfang 2013            |                    | ca. 350.000 €                               | Datenquelle: LoD1 der AdV („Klötzchenmodell“)                                 |            |
| Gebäudehöhe                    | 3D-<br>Gebäudemodell LoD1       | Gegeben ab Anfang 2013            |                    | ca. 350.000 €                               | Datenquelle: LoD1 der AdV („Klötzchenmodell“)                                 |            |
|                                | LIDAR DEM                       | Nicht flächendeckend              |                    | 80,- € / km <sup>2</sup>                    | Datenquelle: DEM-Daten der Landesvermessungsämter                             |            |
|                                | Cartosat-1<br>Stereo PAN<br>DSM | Gegeben                           |                    | 1.606.599,00<br>(4,50 € / km <sup>2</sup> ) |   |            |
| Gebäudealter                   | Infas Daten                     | Gegeben                           |                    | 25.200,00 €                                 | Datenquelle: LOCAL® Haus der Infas GmbH; Raumbezug: Quartiersebene            |            |

|  |                              |  |                            |  |
|--|------------------------------|--|----------------------------|--|
| <b>Gradtagzahlen</b>                   | Klimadaten                   | Gegeben                                  | 476,-€                     | Datenquelle:<br>Gradtagzahlen in<br>1x1 km Raster<br>des DWD   |
| <b>Straßennetz</b>                     | ATKIS (Verkehr)              | Gegeben                                  | Kostenfrei *               | Datenquelle:<br>BKG  |
| <b>Nutzungsart</b>                     | ATKIS (Siedlung)             | Gegeben                                  | Kostenfrei *               | Datenquelle:<br>BKG  |
| <b>Bodenbedeckung<br/>(Vegetation)</b> | Luftbilddaten                | Gegeben                                  | Kostenfrei *               | Datenquelle:<br>BKG; hohe Anforderungen an<br>Prozessierung  |
|  | RapidEye Datensatz           | Bundesweit verfügbar<br>(Erhebung: 2009) | Kostenfrei *               | Datenprovider:<br>RapidEye AG:   |
| <b>Dachfläche</b>                      | DEM (Bodenauflösung<br>< 1m) | Nicht flächendeckend<br>verfügbar        | 80,- € / km <sup>2</sup>   | Bodenauflösung<br><1m bundesweit<br>nur teilweise verfügbar (v.a.<br>Stadtgebiete)                     |
|  | 3D-Gebäudemodell LoD2        | Nicht verfügbar (geplant)                | Keine Angaben              | Derzeit noch<br>keine konkreten<br>Informationen<br>über Realisierung<br>verfügbar                     |
| <b>Dachausrichtung</b>                 | DEM (Bodenauflösung<br>< 1m) | Nicht flächendeckend<br>verfügbar        | 80,- € / km <sup>2</sup>   | Bodenauflösung<br><1m nur teilweise<br>verfügbar   |
|  | 3D-Gebäudemodell LoD2        | Nicht verfügbar (geplant)                | Keine Angaben              | Derzeit noch<br>keine konkreten<br>Informationen<br>über Realisierung<br>verfügbar                     |
| <b>Dachneigung</b>                     | DEM (Bodenauflösung<br>< 1m) | Nicht flächendeckend<br>verfügbar        | 80,- € / km <sup>2</sup>   | Bodenauflösung<br><1m nur teilweise<br>verfügbar   |
|  | 3D-Gebäudemodell LoD2        | Nicht verfügbar (geplant)                | Keine Angaben              | Derzeit noch<br>keine konkreten<br>Informationen<br>über Realisierung<br>verfügbar                     |
| <b>Oberflächenmaterial</b>             | Hyperspektaldaten            | Nicht flächendeckend<br>verfügbar        | Abhängig von<br>Befliegung | Derzeit nur flugzeuggestützte<br>Aufnahmen möglich,<br>nicht realisierbar für<br>gesamtes Bundesgebiet |

\* Bereitstellung über BKG für Forschungszwecke bzw. nachgeordnete Bundesbehörden

### 5.3 Forschungsbedarf und Handlungsempfehlungen

Mit der vorliegenden Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass eine automatisierte Erfassung des Nahwärmepotenzials anhand der Auswertung von vorliegendem kartographischen Material (DTK25-V) möglich ist. Insbesondere konnten die Netzlängen aus den Straßenlängen und dem Straßenabstand jedes einzelnen Gebäudes ermittelt werden. Die neue Methodik bietet noch in mehrfacher Hinsicht Entwicklungspotenzial. Dies betrifft sowohl die Methodik zur Auswertung der vorhandenen Informationen als auch eine qualitative Verbesserung und Erweiterung der derzeitigen Datenbasis. Optimierungspotenzial kann dabei insbesondere durch die Adressierung folgender Punkte erreicht werden:

- Verbesserung des Modells zur Bestimmung der Netzlängen (das derzeitige Modell überschätzt die tatsächlich erforderliche Netzlänge).
- Ausschluss von Gebieten mit sehr geringen Wärmedichten bei der Berechnung der nahwärmerelevanten Parameter einer Gemeinde.
- Untergliederung des Nahwärmepotenzials innerhalb einer Gemeinde in Gebiete mit höheren und geringeren Wärmedichten.
- Berücksichtigung von Niedertemperaturprozesswärme zusätzlich zum Bedarf an Raumwärme und Warmwasser.
- Überprüfung des derzeit verwendeten Kostenansatzes für den Bau von Wärmeleitungen in innerstädtischen Bereichen.

Durch eine qualitative Verbesserung und Erweiterung der Datenbasis sind zudem weitere positive Effekte zu erwarten:

- Die bisher produzierten Resultate werden inhaltlich genauer und damit verlässlicher.
- Über die verbesserte und erweiterte Datengrundlage können Informationen abgeleitet werden, die bisher ausschließlich über aufwendige Verfahren (z.B. Begehungen) oder aber aus einer Vielzahl unterschiedlicher Quellen gewonnen werden mussten. Zudem können durch die Konzentration auf wenige Datenquellen die Auswertung einheitlicher und der Automatisierungsgrad der Datenverarbeitung erhöht werden.

Wichtige Ziele, die durch die zuvor dargelegten Optimierungen und Maßnahmen erreicht werden sollen, sind:

- Verbesserung der räumlichen Auflösung gegenüber der bislang genutzten DTK25-V. Hierdurch wird etwa eine Unterscheidung zwischen Wohngebäuden und Nebengebäuden (z.B. größere Schuppen) erleichtert.

- Ermittlung des Volumens einzelner Gebäude. Hierdurch lässt sich der einer Gemeinde zugeordnete Wärmebedarf exakter auf die einzelnen Gebäude aufteilen.
- Bestimmung des mittleren Baualters der Gebäude in einer Gemeinde anhand von georeferenzierten Daten. Auf diese Weise könnte die methodenfremde Quelle (Infas-Daten), mit welcher bisher das mittlere Baualter innerhalb einer Gemeinde ermittelt wurde, ersetzt werden.
- Integration des lokal vorhandenen Potenzials erneuerbarer Energien in die Untersuchung. Hierdurch wird ein weiterer wichtiger Punkt bei der Analyse des Nahwärmepotenzials berücksichtigt, denn dies ermöglicht bereits die Ausarbeitung von - wenn auch noch relativ groben - Energiekonzepten für jede Gemeinde nach einem einheitlichen Raster.
- Berücksichtigung von raumordnerischen Gesichtspunkten und von Transportentfernungen. Dazu gehören die optimale Zuordnung des lokal oder regional vorhandenen Biomassepotenzials zu den Verbrauchern in einer Kommune und die Bestimmung von geeigneten Standorten für Heizzentralen. Ebenso soll die Ausweisung geeigneter Freiflächen für die Erzeugung solarer Wärme ermöglicht werden.

Ein weiteres, sehr bedeutendes Ziel neben den zuvor dargelegten Verbesserungen in Bezug auf die Datenbasis, die Methodik und die Aussagekraft der Ergebnisse ist die Entwicklung eines umfassenden Validierungskonzepts zur objektiven Überprüfung und ggf. gezielten Optimierung der Wärmepotenzialabschätzung. Für das Gros der im Zuge dieser Studie berechneten Zwischen- und Endprodukte konnte in Ermangelung geeigneter Referenzinformationen nur sehr bedingt eine quantitative Bewertung der erzielten Ergebnisse durchgeführt werden. So musste vielfach auf reine Plausibilitätschecks zurückgegriffen werden. Daher sollte eine gezielte Erfassung und Sammlung geeigneter Referenzdaten - etwa aus lokalen Studien und Erhebungen zum Gebäudebestand und zur Trassenlänge - vorangetrieben werden, was aufgrund des sehr begrenzten Zeitrahmens im Rahmen dieser Studie leider nicht möglich war.

Im Rahmen der durchgeführten Studie lag der Fokus der Betrachtungen auf den Themenkomplexen Energieeffizienz und Klimaschutz. Nichtsdestotrotz können die abgeleiteten Geoinformationen bzw. Geobasisdaten auch zahlreiche weitere Anwendungsfelder unterstützen. Dazu zählen insbesondere die Stadt- und Raumplanung. Grundsätzlich kennzeichnen die demonstrierten Produkte die bebauungs- und nutzungsstrukturellen Eigenschaften des Siedlungskörpers. Somit lassen sie direkt oder indirekt Rückschlüsse auf zahlreiche planungsrelevante Parameter zu – etwa Durchgrünung, Versiegelung, Einwohnerzahl oder bauliche Dichte. Gleichzeitig können diese raumstrukturellen Eigenschaften mit sozio-ökonomischen Kennzahlen oder Statistiken verschnitten oder zur Typisierung von Siedlungsstrukturtypen herangezogen werden. Entsprechende Auswertungen und Vergleiche eröffnen mitunter völ-



lig neue Einsichten in komplexe Wirkungszusammenhänge. Vor diesem Hintergrund ist es von besonderem Interesse, den spezifischen Nutzen der beschriebenen raumstrukturellen Geodaten im Rahmen disziplinübergreifender Forschungsarbeiten zu bestimmen. Als besonders vielversprechende Anwendungsfelder sind dabei zu nennen:

- Typisierung des Siedlungsraums (Gebäudetyp, Bebauungsmuster, Gebäudeabstand)
- Stadtklimatologische Bewertungen
- Infrastrukturplanung
- Lärm- und Immissionsmodellierungen
- Risikoanalyse, Krisen- und Katastrophenmanagement

Abschließend sei noch angemerkt, dass die Nutzung hoch aufgelöster Satellitendaten gegenüber terrestrisch erhobenen Daten gewisse Vorteile bietet. Eine einheitliche, lückenlose und bundesweite Datenerhebung ist a priori garantiert und einer Erweiterung des Untersuchungsgebietes auf das benachbarte Ausland steht grundsätzlich nichts entgegen. Satelliten liefern darüber hinaus Daten, die sich unter Umständen gegenseitig ergänzen. Ein weiterer langfristiger Vorteil einer satellitengestützten Datenerhebung ist, dass hier Genauigkeit und Auflösung der Sensoren stetig zunehmen. Die auf Satellitendaten gestützten Methoden werden daher zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen. Bei der mit Forschungsmitteln finanzierten Methodenentwicklung muss daher die Kompatibilität mit zukünftig zur Verfügung stehenden Satellitendaten im Auge behalten werden. Ein zentraler Aspekt ist in diesem Zusammenhang auch der weitere Ausbau von Ansätzen zur Zusammenführung von unterschiedlichsten Datentypen aus diversen Bezugsquellen (information fusion) – etwa Erdbeobachtungsdaten, Informationen der amtlichen Vermessung und Statistik sowie ggf. Daten von Vor-Ort-Erhebungen.

## 6 Quellenverzeichnis

- AMANN, V. (1986): Multispektraler Linescanner DAEDALUS AADS 1268 (ATM). Leitfaden für den Datennutzer. Interne Datenbeschreibung.
- ADV (2010): Tätigkeitsbericht 2009/2010, [www.adv-online.de](http://www.adv-online.de), abgerufen am 23.12.2010.
- BAATZ, M. & SCHÄPE, A. (2000). Multiresolution Segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In Strobl, J. et al. (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Wichmann, S.12-23.
- BBSR (2011): Laufenden Raumb Beobachtung – Raumabgrenzungen. Siedlungsstrukturelle Kreistypen.  
[http://www.bbsr.bund.de/cIn\\_016/nn\\_103086/BBSR/DE/Raumb Beobachtung/Werkzeuge/Raumabgrenzungen/SiedlungsstrukturelleGebietstypen/Kreistypen/kreistypen.html](http://www.bbsr.bund.de/cIn_016/nn_103086/BBSR/DE/Raumb Beobachtung/Werkzeuge/Raumabgrenzungen/SiedlungsstrukturelleGebietstypen/Kreistypen/kreistypen.html) (Ab-rufdatum: 10.02.2011).
- BLASCHKE, T. (2010): Object based image analysis for remote sensing. ISPRS International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65 (1), 2-16.
- BLES, M., FAHL, U. & VOß, A. (2001): Wärmeversorgung des Gebäudebestandes. In: Neuffer, H. & F.-G. Witterhold (Hrsg.): Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisiertem Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und erneuerbarer Technologien. AGFW-Bericht zur pluralistischen Wärmeversorgung. AGFW-Hauptstudie – Erster Bearbeitungsband, Band 2, S. 19-145, Frankfurt am Main.
- BÖHNISCH, H., ERBAS, K., NAST, M. & SCHREITMÜLLER, D. K. (2001): Nahwärme im Gebäudebestand – Anlagenaspekte und Umsetzung. In: Integration erneuerbarer Energien in Versorgungsstrukturen. Forschungsverbund Sonnenenergie 2002, S. 82-91, Berlin.
- BREUSTE, J., WÄCHTER, M. & BAUER, B. (Hrsg.) (2001): Beiträge zur umwelt- und sozialverträglichen Entwicklung von Stadtregionen. CD-ROM, UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig – Halle.
- BRUSE, M. & FLEER, H. (1998): Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. Environmental Modelling and Software, 1998, 13, 373-384.
- COCKS, T., JENSSEN, R., STEWART, A., WILSON, I. & SHIELDS, T. (1998): The HyMap airborne hyperspectral sensor: the system, calibration and performance. Proceedings of the 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, 1998.

- DIEFENBACH, N. & ENSELING, A. (2007): Potentiale zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Wärmeversorgung von Gebäuden in Hessen bis 2012. Studie im Rahmen von INKLIM 2012.
- DLR (1997): Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: M. Nast u.a.: Klimaschutzkonzept für das Saarland, Materialband 2 „Potenzial der Kraft-Wärme/Kälte-Kopplung und Nutzung regenerativer Energien. Studie von Prognos, DLR und Wuppertal Institut im Auftrag des saarländischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Verkehr, Stuttgart.
- DLR (2005): Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: M. Nast u.a.: Analyse des nationalen Potenzials für den Einsatz hocheffizienter KWK, einschließlich hocheffizienter Kleinst-KWK, unter Berücksichtigung der sich aus der EU-KWK-RL ergebenden Aspekte. Studie von bremer energie institut und DLR im Auftrag des BMWA, Stuttgart.
- DLR (2009): Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Planetenforschung. HRSC-AX URL: <http://www.dlr.de/pf/desktopdefault.aspx/tabid-331> (Abrufdatum: 15.04.2010).
- EICKMEIER, B. & SCHULZ, W. (2004): Digitale Wärmekarte Deutschlands. Aufbereitung, Konvertierung und Ergänzung von Gebäude- und Siedlungsdaten durch ein auf Statistiken und örtlichen Daten beruhenden Verfahren. Methodische Vorgehensweise und Ergebnisse. In: Lutsch, W., Neuffer, H. & F.-G. Witterhold (Hrsg.): Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien. AGFW-Hauptstudie - Erster Bearbeitungsschritt, Band 1, S. 135-234, Frankfurt am Main.
- EICKMEIER, B., GABRIEL, J., SCHULZ, W., NAST, M. & KREWITT, W. (2006): Analyse des nationalen Potenzials für den Einsatz hocheffizienter KWK, einschließlich hocheffizienter Kleinst-KWK, unter Berücksichtigung der sich aus der EU-KWK-RL ergebenden Aspekte. Studie des Bremer Energie Institut und DLR im Auftrag des BMWA, Stuttgart.
- EUSI (2010): <http://www.euspaceimaging.com/> (Abrufdatum: 23.12.2010).
- FISCHEDICK, M., SCHÜWER, D., VENJAKOB, J., MERTEN, F., MITZE, D., NAST, M., SCHILLINGS, C., KREWITT, W., BOHNENSCHÄFER, W. & LINDNER, K. (2007): Anforderungen an Nah- und Fernwärmenetze sowie Strategien für Marktakteure in Hinblick auf die Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung bis zum Jahr 2020. Sonstiger Bericht, UFOPLAN Vorhaben 20541104, 221 S..
- FOLLMANN, J. (1999): Geographische Informations-Systeme zum Aufbau eines Verkehrsinformations-Systems, In: Verkehr und Technik, 43, S.76-79.
- GEIß, C., NAST, M., SCHILLINGS, C., TAUBENBÖCK, H., ESCH, T. & WURM, M. (2010): Potenzial-

- modellierung von Wärmenetzen basierend auf höchst aufgelösten Fernerkundungsdaten. In: Taubenbock, H. & Dech, S. (Hrsg.): Fernerkundung im urbanen Raum - Die Erdbeobachtung auf dem Weg zur Planungspraxis. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. S. 192.
- GEIß, C., TAUBENBÖCK, H., WURM, M., ESCH, T., NAST, M., SCHILLINGS, C., & BLASCHKE, T. (2011): Remote Sensing-Based Characterization of Settlement Structures for Assessing Local Potential of District Heat. *Remote Sensing*, 3 (7), S. 1447-1471.
- GENSKE, D., JÖDECKE, T., RUFF, A., & PORSCHE, L. (2009): Nutzung städtischer Freiflächen für erneuerbare Energien. Nordhausen, 150 S.
- GEOEYE (2010): <http://www.geoeye.com/CorpSite/> (Abrufdatum: 23.12.2010).
- HELDENS, W. (2010): Use of airborne hyperspectral data and height information to support urban micro climate characterisation. PhD Thesis, Bayerischen Julius-Maximilians Universität Würzburg, 2010.
- HELDENS, W. & HEIDEN, U. (2010): Selektive Identifikation umweltrelevanter Oberflächenmaterialien auf der Basis von Hyperspektraldaten: Beispiel Solarflächen. In: Taubenbock, H. & Dech, S. (Hrsg.): Fernerkundung im urbanen Raum – Die Erdbeobachtung auf dem Weg zur Planungspraxis. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, S. 192.
- KAYSER, M. & KALTSCHMITT, M. (1998): Potenziale hydrothermaler Erdwärme in Deutschland. Geothermie Report 98-1 des GFZ Potsdam.
- KLEEMAN, M., KRÜGER, B. & HECKLER, R. (2004): Verbrauchskennzahlen für Wohn- und Nichtwohngebäude in Städten. In: Lutsch, W., Neuffer, H. & Witterhold, F.-G. (Hrsg.): Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien. AGFW-Hauptstudie – Erster Bearbeitungsschritt, Band 1, S. 25-131, Frankfurt am Main.
- KNIERIM, R. (2009): Vortragsunterlagen zur Konferenz „Planung und Realisierung von Nah- und Fernwärmenetzen“ am 10.11.2009 in Stuttgart.
- KRAUS, K. (2004): Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Walter de Gruyter, 516 S., Berlin.
- LANG, S. & BLASCHKE, T. (2007): Landschaftsanalyse mit GIS. Stuttgart.
- LEHMANN, F., HOFFMANN, A., RENOUARD, L. & VEGT, J.W. VAN DER (2000): The High Resolution Stereo Camera - Airborne (HRSC-A). *GIM International*, 14 (7), Seiten 12-17.
- LUTSCH, W. & WITTERHOLD, F.-G. (2005): Perspektiven der Fernwärme und Kraft-Wärme-Kopplung. Ergebnisse und Schlussfolgerungen der AGFW-Studie „Pluralistische Wär-

- meversorgung“, Frankfurt am Main.
- MARQUARDT, H. (2004): Energiesparendes Bauen. Von der Europäischen Normung zur Energiesparverordnung. Stuttgart.
- MARTENS, J. (2003): Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows. 2., überarb. u. erw. Aufl., XI, 308 S., Oldenburg.
- MAYER, S. (2003): Automatisierte Objekterkennung zur Interpretation hochauflösender Bilddaten in der Erdfernerkundung. Dissertation, Berlin.
- MEINEL, G., HECHT, R., HEROLD, H., SCHILLER, G., SPANGENBERG, M., BURGDORF, M. & KAWKA, R. (2008): Automatische Ableitung von stadtstrukturellen Grundlagendaten und Integration in einem Geographischen Informationssystem. In: BMVBS, BBR (Hrsg.): Forschungen Heft 134, Bonn.
- NAST, M. (2004): Chancen und Perspektiven der Nahwärme im zukünftigen Energiemarkt. Fachtagung „Nahwärme 2004“, Osnabrück.
- NAST, M., LEHR, U., KLINSKI, S., BÜRGER, V., LEPRICH, U., KLANN, U., HORST, J., RAGWITZ, M. & SCHULZ, W. (2009): Ergänzende Untersuchungen und vertiefte Analysen zu möglichen Ausgestaltungsvarianten eines Wärmegesetzes. Bericht im Auftrag des BMU, Stuttgart.
- NEIDHART, H. & BRENNER, C. (2003): Automatic Calculation of Building Volumes for an area-wide Determination of Heat Requirements. In: Proc. ISPRS Commission IV Joint Workshop 'Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II', Proceedings, September 8 - 9, S. 137–142, Stuttgart.
- NEIDHART, H. & SESTER, M. (2006): Creating a digital thermal map using laser scanning and GIS. Proceedings of the District Heat and Cooling Symposium, Hannover.
- NITSCH, J. (2008): Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie erneuerbare Energie“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas. Untersuchung im Auftrag des BMU, Stuttgart.
- NITSCH, J. & WENZEL, B. (2009): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland unter Berücksichtigung der europäischen und globalen Entwicklung. Leitszenario 2009, Untersuchung im Auftrag des BMU, Stuttgart.
- PAULEIT, S. (1998): Das Umweltwirkgefüge städtischer Siedlungsstrukturen: Darstellung des städtischen Ökosystems durch eine Strukturtypenkartierung zur Bestimmung von Umweltqualitätszielen für die Stadtplanung. Dissertation, Technische Universität München.
- ROTH, U., GINSBURG, T., LEDERGERBER, E., MARTIN, W., SEUNIG, G., KASEL, H. & DEUCHER, A. (1977): Auswirkungen von Entwicklungen im Energiesektor auf die Raum- und Siedlungsstruktur. Schriftenreihe „Raumordnung“ des Bundesministers für Raumordnung,

- Bauwesen und Städtebau, 06011, Bonn – Bad Godesberg.
- ROTH, U., HÄUBLI, F. & ALBRECHT, L. (1980): Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungs-systemen. Schriftenreihe „Raumordnung“ des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, 06044, Bonn – Bad Godesberg.
- RUHL, V., LÜTTER, F., SCHMIDT, C. WACKERBAUER, J. & TRIEBSWETTER, U. (2008): Standortgutachten Photovoltaik in Deutschland. Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München, EuPD Research, S. 28.
- SCHARDINGER, I. (2008): GIS-gestützte Standortevaluierung für Biogasanlagen im Bundesland Tirol. In: Strobl, J., Blaschke, T. & G. Griesebner (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2007, Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 491- 500.
- SCHILLINGS, C., NAST, M., FISCHEDICK, M. & VENJAKOB, J. (2007): Nutzung von Satellitendaten für die Regionalisierung des regenerativen Nahwärmepotenzials in Deutschland. Energiewirtschaftliche Tagesfragen (10), Seiten 84-88. etv GmbH, Essen, ISSN 0720-6240.
- SCHUURMAN, N. (2004): GIS: a short introduction. Bodmin.
- SESTER, M., NEIDHART, H., SCHULZ, W. & EIKMEIER, B. (2004): Verfahrensentwicklung zur Bestimmung einer digitalen Wärmebedarfskarte aus Laserscanning- und GIS-Daten. In: Lutsch, W., Neuffer, H. & Witterhold, F.-G. (Hrsg.): Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien. AGFW-Hauptstudie - Erster Bearbeitungsschritt, Band 1, S. 235-301, Frankfurt am Main.
- STJB – STATISTISCHES JAHRBUCH (1991, 1998, 2004, 2009): Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland. Wiesbaden.
- TAUBENBÖCK, H. (2008): Vulnerabilitätsabschätzung der erdbebengefährdeten Megacity Istanbul mit Methoden der Fernerkundung. Dissertation. Universität Würzburg. <http://www.opus-bayern.de/uni-wuerzburg/volltexte/2008/2804/>
- TAUBENBÖCK, H. & ROTH, A. (2010): Fernerkundung im urbanen Kontext. In: Taubenbock, H. & Dech, S. (Hrsg.): Fernerkundung im urbanen Raum – Die Erdbeobachtung auf dem Weg zur Planungspraxis. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt. S. 31-43.
- TAUBENBÖCK, H. HELDENS, W., HEIDEN, U. & WURM, M. (2010): Physische Indikatoren für die Stadtplanung. In: Taubenbock, H. & Dech, S. (Hrsg.): Fernerkundung im urbanen Raum – Die Erdbeobachtung auf dem Weg zur Planungspraxis. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. S. 192.
- TOOKE, R., COOPS, N. & VOOGT, J. A. (2009): Assessment of urban tree shade using fused



- LIDAR and high spatial resolution imagery. JURSE conference, 2009, Shanghai, China.
- WINKENS, H.P. (1985): Untersuchung einer zum Heizöl alternativen Wärmebedarfsdeckung für den Rhein-Neckar-Raum. Örtliche und Regionale Versorgungskonzepte, Band 4. Mannheim.
- WURM, M., TAUBENBÖCK, H., ROTH, A. & DECH, S. (2009): Urban structuring using multisensoral remote sensing data – by the example of German cities – Cologne and Dresden. In: Urban Remote Sensing Joint Event, Shanghai, China. pp. 8.
- WURM, M. & TAUBENBÖCK, H. (2010): Das 3-D Stadtmodell als planungsrelevante Grundlageninformation. In: Taubenbock, H. & Dech, S. (Hrsg.): Fernerkundung im urbanen Raum – Die Erdbeobachtung auf dem Weg zur Planungspraxis. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. S. 192.
- WURM, M.; TAUBENBÖCK, H.; SCHARDT, M.; ESCH, T.; DECH, S. (2011): Object-based image information fusion using multisensor earth observation data over urban areas. In: International Journal of Image and Data Fusion 2(2), pp. 121–147

Anhang

A. Tabellen

Tabelle A I: Alternative Kennzahlen zum volumenspezifischen Raumwärmebedarf (anhand der Gradtagzahl Münchens, korrigierte Werte auf Basis von Diefenbach & Ensling, 2007 und Fishedick et al., 2007).

| Baualterklasse | Heizwärmebedarf [kWh/m²*Jahr] |       |       |                   |       |       |                  |       |       |
|----------------|-------------------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
|                | Wohngebäude                   |       |       | gemischte Nutzung |       |       | Nichtwohngebäude |       |       |
|                | EFH                           | KMH   | GMH   | kGgN              | mGgN  | gGgN  | kNWG             | mNWG  | gNWG  |
| < 1900         | 281,6                         | 263,2 | 146,9 | 250,2             | 231,6 | 146,5 | 181,7            | 163,8 | 147,0 |
| 1900-1945      | 274,0                         | 164,3 | 171,9 | 244,8             | 160,4 | 164,5 | 180,8            | 153,1 | 149,7 |
| 1946-1960      | 277,3                         | 229,5 | 173,0 | 247,1             | 207,4 | 165,3 | 181,2            | 160,1 | 149,8 |
| 1961-1970      | 227,3                         | 206,7 | 165,4 | 211,1             | 190,9 | 159,8 | 175,8            | 157,7 | 149,0 |
| 1971-1980      | 179,5                         | 180,6 | 153,4 | 176,7             | 172,2 | 151,2 | 170,7            | 154,9 | 147,7 |
| 1981-1985      | 134,9                         | 153,4 | 153,4 | 144,7             | 152,6 | 151,2 | 165,9            | 152,0 | 147,7 |
| 1986-1995      | 187,1                         | 131,7 | 153,4 | 182,2             | 137,0 | 151,2 | 171,5            | 149,6 | 147,7 |
| 1996-2000      | 145,8                         | 100,2 | 153,4 | 152,5             | 114,3 | 151,2 | 167,0            | 146,2 | 147,7 |
| > 2000         | 134,9                         | 94,7  | 153,4 | 144,7             | 110,4 | 151,2 | 165,9            | 145,6 | 147,7 |

B. Abbildungen

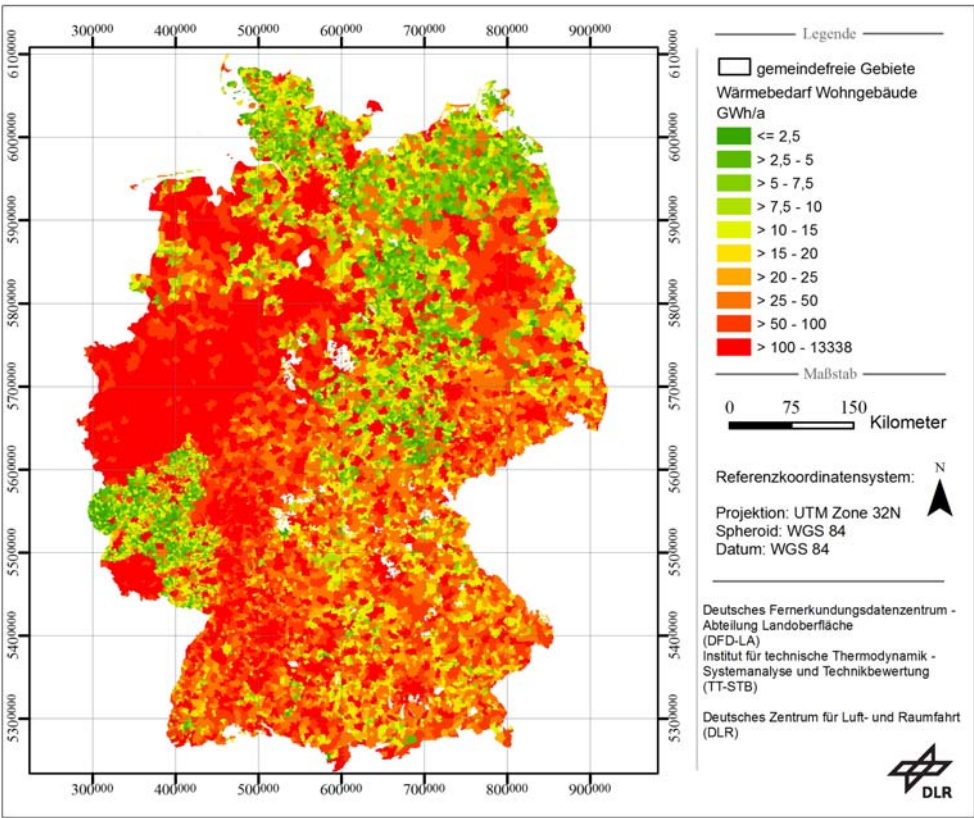
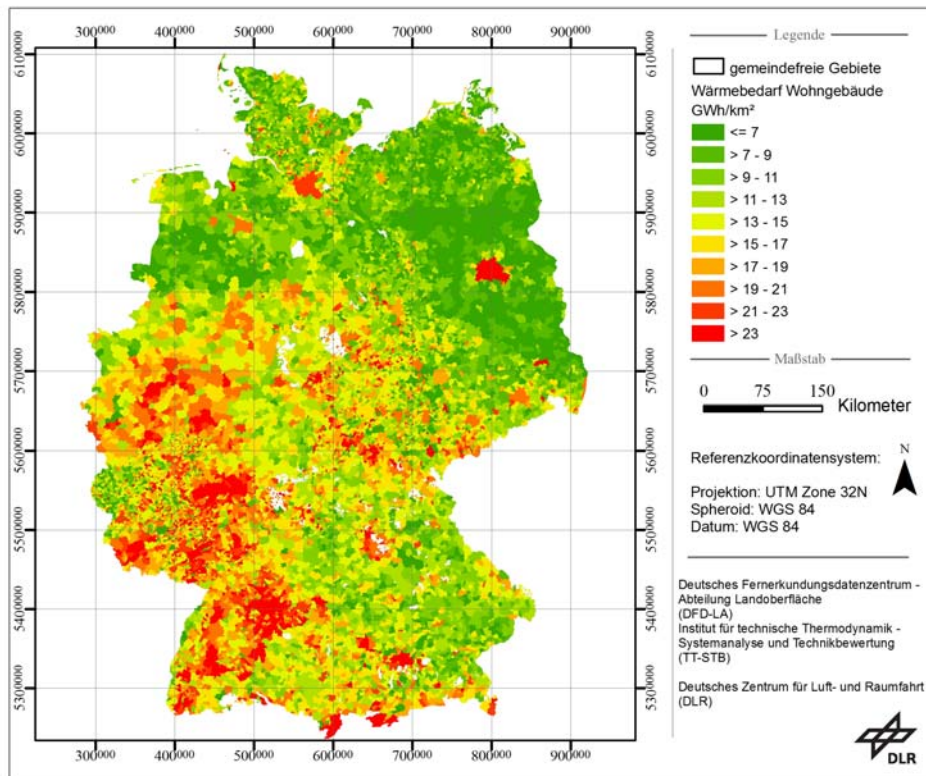
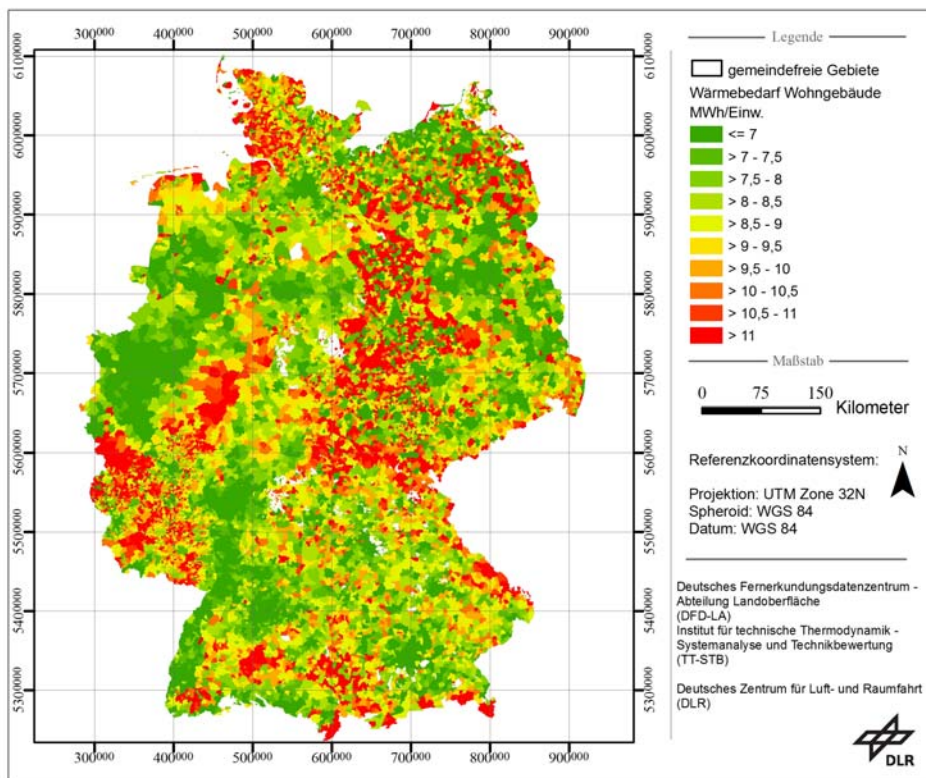


Abbildung B I: Regionalisierter Wärmebedarf der Wohngebäude pro Gemeinde.



**Abbildung B II: Wärmedichte - Regionalisierter Wärmebedarf der Wohngebäude pro Gemeinde bezogen auf Siedlungsfläche.**



**Abbildung B III: Regionalisierter Wärmebedarf der Wohngebäude pro Gemeinde bezogen auf Einwohner.**



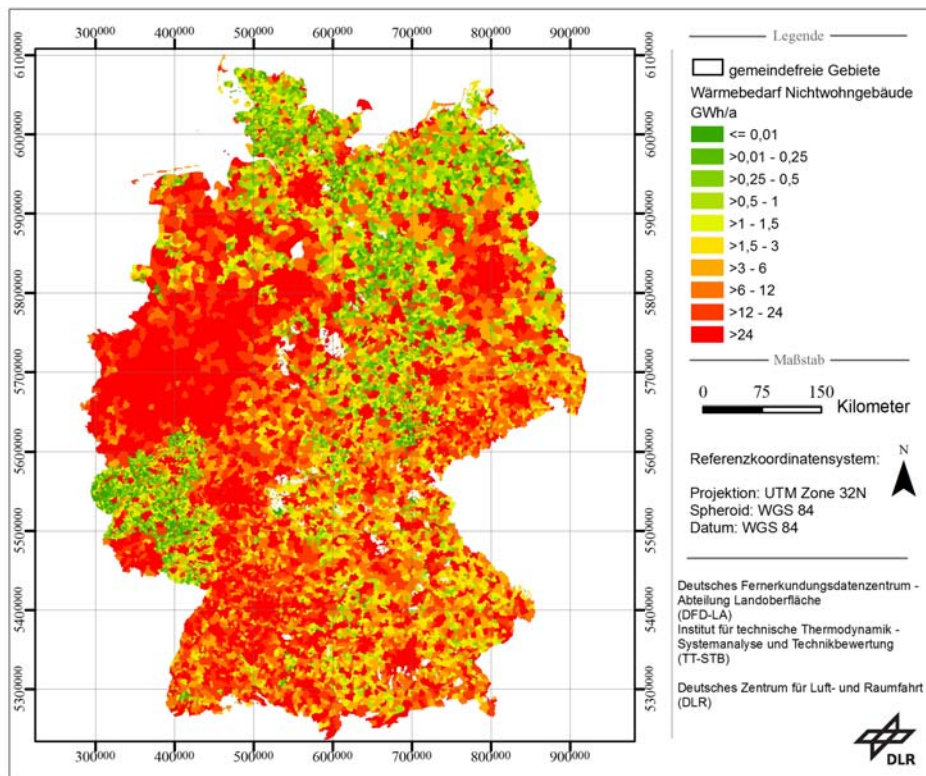


Abbildung B IV: Regionalisierter Wärmebedarf der Nichtwohngebäude pro Gemeinde.

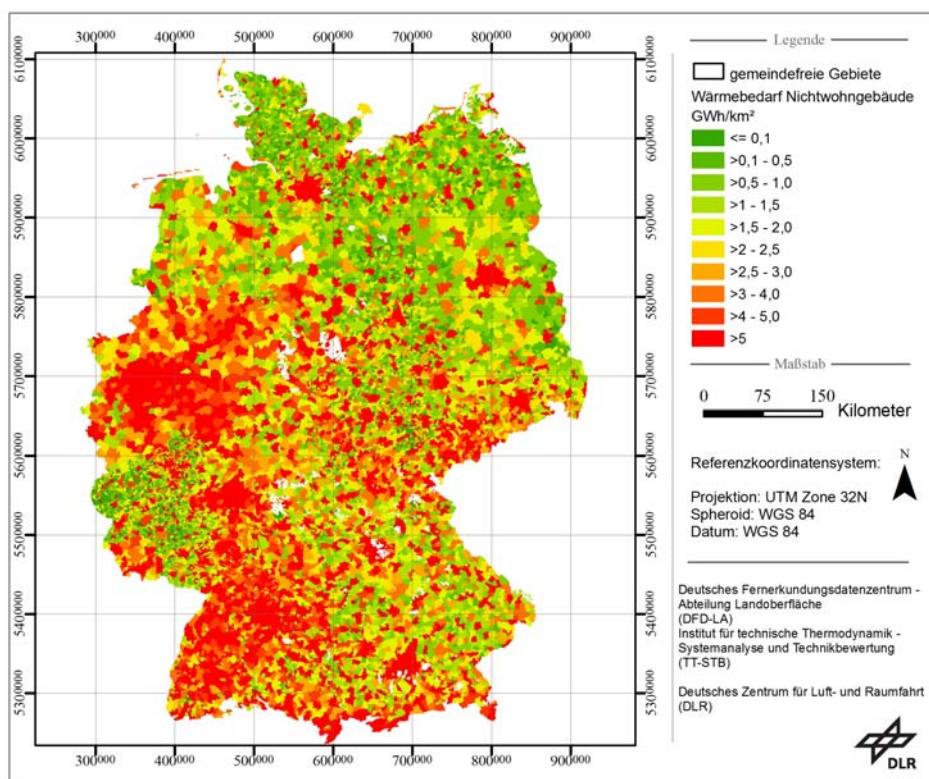
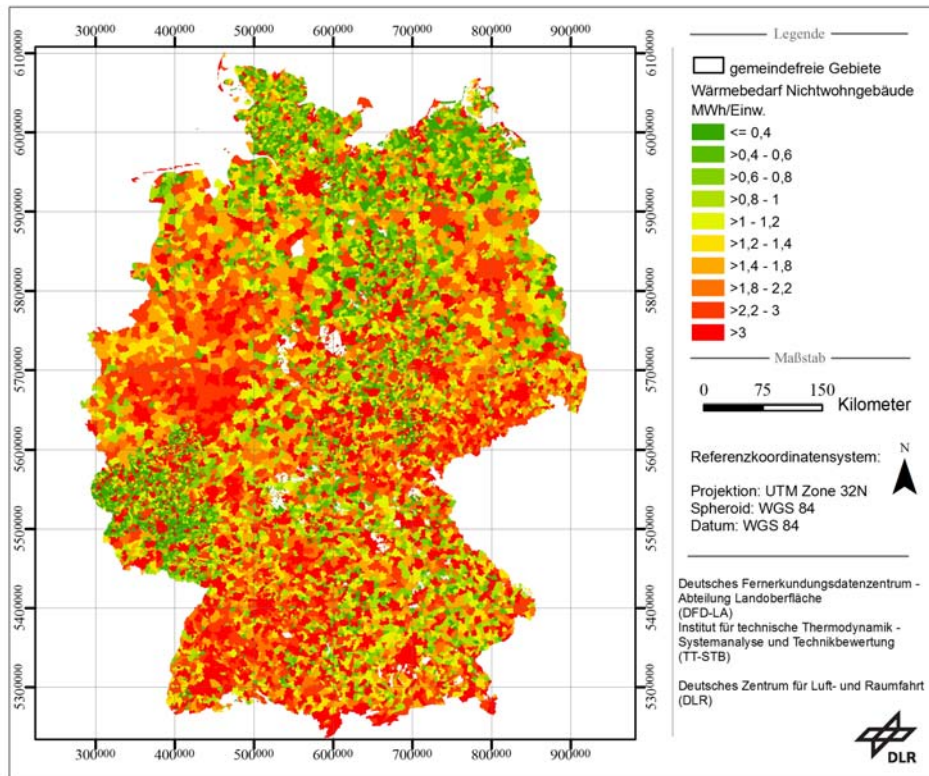


Abbildung B V: Wärmedichte - Regionalisierter Wärmebedarf der Nichtwohngebäude pro Gemeinde bezogen auf Siedlungsfläche.



**Abbildung B VI: Regionalisierter Wärmebedarf der Nichtwohngebäude pro Gemeinde bezogen auf Einwohner.**